

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
En Sciences de la Terre
Option: Hydrogéologie

**Modélisation d'un processus d'aide à la décision
multicritère en environnement imprécis et son intégration
à un SIG: Application à l'implantation de forages de
captage d'eau.**

Présentée et soutenue publiquement par :
Mme. Dekkiche Hafida née Boukrentach

Devant le jury composé de :

M. Mansour Hamidi	Professeur	Université d'Oran 2	Président
M. Benali Abdelmajid	Professeur	Université d'Oran 2	Rapporteur
Mme. Hamadou Djamil	Professeur	Université d'Oran 1	Examinatrice
M. Mendas Abdelkader	Directeur de recherche	C T S	Examineur
M. Hassani Moulay Idriss	Professeur	Université d'Oran 2	Examineur
M. Boudjemline Djamel	M.C.A	USTO	Examineur
M. Bouamrane Karim	Professeur	Université d'Oran1	Invité

Année 2023

REMERCIEMENTS

Je remercie le bon Dieu miséricordieux de m'avoir donné la force pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse M. Benali Abdelmajid de m'avoir aidé, conseillé et dirigé tout le long de ces années. Merci pour tout.

Mes remerciements les plus sincères aux membres du jury, à savoir : M. Mansour Hamidi, Professeur à l'Université d'Oran2, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury, Mme. Hamadou Djamila, Professeur à l'Université d'Oran1, M. Mendas Abdelkader, Professeur et Directeur de recherche au Centre des Techniques Spatiales d'Arzew, M. Hassani Moulay Idriss, Professeur à l'Université d'Oran2, M. Benamrane Karim, Professeur à l'Université d'Oran1, M. Boudjemline Djamel, Maître de conférence "A" à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je voudrai remercier tout particulièrement mon mari pour le soutien et l'aide qu'il m'a apporté.

Je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père.

Résumé

Faire le meilleur choix est l'objectif de tout décideur face à une situation de prise de décision. Une des caractéristiques du monde réel, qui rend la prise de décision difficile, est son aspect multicritère. La sélection de sites potentiels pour l'implantation de forage d'eau est un exemple concret de processus de prise de décision. C'est un processus difficile, complexe et long, nécessitant l'évaluation de nombreux critères hétérogènes. Dans la plupart des cas, ces évaluations sont vagues, imprécises ou subjectives. L'utilisation des particularités qu'offrent la logique floue et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) est une bonne approche pour la modélisation et l'agrégation de ces connaissances. Le thème développé dans cette thèse consiste à présenter une analyse de décision multicritère floue pour le développement d'un Système d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) combiné permettant la sélection de sites potentiels de forage de captage d'eau dans le plateau de Mostaganem, situé au nord-ouest de l'Algérie. L'approche adoptée comprend deux étapes: dans la première étape, des cartes thématiques et un ensemble de critères (géologiques, hydrologiques, topographiques, environnementaux, etc.) sont utilisés dans un SIG, pour présélectionner les sites potentiels de forage d'eau. Une modélisation floue de la distribution spatiale des niveaux piézométriques de la zone d'étude est utilisée et une carte de rabattement est établie. A la fin de cette étape, dix (10) sites potentiels sont sélectionnés. Les évaluations des experts de chaque site potentiel, par rapport aux différents critères, sont imprécises lors de cette première étape. Leur modélisation par des variables linguistiques et des nombres flous est nécessaire. Ainsi, une méthode Multi-Critère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD) est appliquée dans une deuxième étape pour classer les sites potentiels présélectionnés. En effet, sur la base d'une première estimation SIG et d'une évaluation finale basée sur la méthode MCFAD, les sites 5, 3 et 1 sont sélectionnés comme les trois premiers sites favorables. Une analyse de robustesse de la méthode de classement MCFAD, développées dans le cadre de cette thèse, a été réalisée en utilisant la simulation de Monte Carlo. Les résultats montrent que le site 5 est classé toujours en premier avec une fiabilité de 100%. Les résultats de cette recherche concordent avec ceux du modèle mathématique du plateau de Mostaganem publiés dans le rapport de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) en 2009.

Mots clés: Sites de forage de captage d'eau, Plateau de Mostaganem, SIG, krigeage flou, MCFAD, SADS.

Abstract

Making the best choice is the goal of every decision-maker when faced with a decision-making situation. One of the specificities of the real world, which makes decision-making difficult, is its multi-criteria aspect. The selection of potential sites for the implantation of a water drilling is a concrete example of the decision-making process. It is a difficult, complex and long process, requiring the evaluation of many heterogeneous criteria. In most cases, these assessments are vague, imprecise or subjective. The use of features offered by fuzzy logic and Geographic Information Systems (GIS) is a good approach for modeling and aggregating this knowledge. The theme developed in this thesis consists in presenting a fuzzy multi-criteria decision analysis for the development of a combined Spatial Decision Support System (SADS) allowing the selection of potential water catchment drilling sites in the plateau of Mostaganem, located in the northwest of Algeria. The approach adopted includes two stages: in the first stage, thematic maps and a set of criteria (geological, hydrological, topographical, environmental, etc.) are used in a GIS, to pre-select sites water drilling potential. A fuzzy modeling of the spatial distribution of the piezometric levels of the study area is used and a drawdown map is established. At the end of this step, ten (10) potential sites are selected. The evaluations of the experts of each potential site, in relation to the various criteria, are imprecise during this first stage. Their modeling by linguistic variables and fuzzy numbers is necessary. Thus, a Fuzzy Multi-Criteria Decision Aiding Method (MCFAD) is applied in a second step to classify the pre-selected potential sites. Indeed, based on a first GIS estimate and a final evaluation based on the MCFAD method, sites 5, 3 and 1 are selected as the first three favorable sites. A robustness analysis of the MCFAD ranking method, developed as part of this thesis, was performed using Monte Carlo simulation. The results show that site 5 is always ranked first with 100% reliability. The results of this research agree with those of the mathematical model of the Mostaganem plateau published in the National Agency for Hydraulic Resources report in 2009.

Keywords: Mostaganem plateau, Water catchment drilling sites, GIS, Fuzzy kriging, MCFAD, SADS.

ملخص

اتخاذ القرار الأفضل هو هدف كل صانع قرار عند مواجهة موقف اتخاذ القرار. من خصائص العالم الحقيقي ، التي تجعل اتخاذ القرار صعباً ، جانبه متعدد المعايير. يعد اختيار المواقع المحتملة لتحديد مواقع آبار المياه مثلاً ملموساً على عملية صنع القرار. إنها عملية صعبة ومعقدة وطويلة وتتطلب تقييم العديد من المعايير غير المتجانسة. في معظم الحالات ، تكون هذه التقييمات غامضة أو غير دقيقة أو ذاتية. يعد استخدام الميزات التي يوفرها المنطق الضبابي وأنظمة المعلومات الجغرافية (SIG) نهجاً جيداً لنمذجة هذه المعرفة وتجميعها. يتمثل الموضوع الذي تم تطويره في هذه الأطروحة في تقديم تحليل قرار غامض متعدد المعايير لتطوير نظام دعم القرار المكاني المشترك (SADS) الذي يسمح باختيار مواقع حفر مستجمعات المياه المحتملة في هضبة مستغانم، الواقعة في شمال غرب الجزائر . يتضمن النهج المعتمد مرحلتين: في المرحلة الأولى، يتم استخدام الخرائط الموضوعية ومجموعة من المعايير (الجيولوجية ، والهيدرولوجية ، والطبوغرافية ، والبيئية ، وما إلى ذلك) في نظام المعلومات الجغرافية (SIG) ، للاختيار المسبق لمواقع التنقيب عن المياه. تم استخدام نمذجة ضبابية للتوزيع المكاني لمستويات قياس الضغط لمنطقة الدراسة وإنشاء خريطة سحب. في نهاية هذه الخطوة، يتم اختيار عشرة (10) مواقع محتملة. تقييمات خبراء كل موقع محتمل ، فيما يتعلق بالمعايير المختلفة ، غير دقيقة خلال هذه المرحلة الأولى. من الضروري نمذجتهم من خلال المتغيرات اللغوية والأرقام الغامضة. وبالتالي، يتم تطبيق طريقة مساعدة القرار متعددة المعايير الضبابية (MCFAD) في الخطوة الثانية لتصنيف المواقع المحتملة المحددة مسبقاً. في الواقع ، بناءً على تقدير SIG الأول والتقييم النهائي بناءً على طريقة MCFAD ، يتم اختيار المواقع 5 و 3 و 1 كأول ثلاثة مواقع مواتية. تم إجراء تحليل المتانة لطريقة الترتيب MCFAD ، والتي تم تطويرها كجزء من هذه الأطروحة ، باستخدام محاكاة مونت كارلو. تظهر النتائج أن الموقع 5 يحتل المرتبة الأولى دائماً بموثوقية 100٪. تتفق نتائج هذا البحث مع نتائج النموذج الرياضي المنشور في تقرير للهضبة (ANRH 2009)

الكلمات المفتاحية: هضبة مستغانم، نظم المعلومات الجغرافية ، مواقع حفر مستجمعات المياه ، كريغ ضبابي ، MCFAD ، SADS.

SOMMAIRE

Résumé.....	I
Abstract	II
ملخص.....	III
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XVI
INTRODUCTION GENERALE.....	1

PREMIERE PARTIE: NOTIONS GENERALES

Chapitre 1: Principes fondamentaux des eaux souterraines

1.1 Introduction	5
1.2 Qu'est-ce que les eaux souterraines ?.....	5
1.3 Hydrogéologie.....	6
1.4 Aquifère et nappe d'eau souterraine	6
1.4.1 Types d'aquifères.....	7
1.4.2 Types de nappes d'eau souterraine	8
1.5 Exploitation des eaux souterraines	9
1.6 Secteur de l'eau en Algérie	9
1.7 Aquifères de l'Algérie.....	10
1.8 Conclusion.....	12

Chapitre 2: Contexte géologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude

2.1 Introduction	13
2.2 Aperçu géographique de la zone d'étude.....	13
2.2.1 Localisation géographique du plateau de Mostaganem.....	13
2.2.2 Morphologie	14
2.2.2.1 Frange littorale	14
2.2.2.2 Plateau proprement dit.....	14
2.2.3 Hydrographie.....	14
2.3 Climatologie	15
2.4 Géologie	16
2.4.1 Formations type allochtone	16
2.4.1.1 Diapirisme	16
2.4.1.2 Nappes de charriages.....	18
2.4.2 Formations autochtones.....	19
2.4.2.1 Miocène	19
2.4.2.2 Pliocène	20
2.4.2.3 Quaternaire	20
2.5 Litho-stratigraphie.....	21
2.6 Etude structurale.....	23
2.6.1 Bordures du Plateau	23
2.6.1.1 Bordure méridionale.....	23
2.6.1.2 Bordure orientale (Bel Hacer)	24
2.6.1.3 Bordure septentrionale	24
2.6.1.4 Bordure occidentale.....	24
2.6.2 Failles	24

2.7 Hydrogéologie	25
2.7.1 Le réservoir	25
2.7.2 Alimentation et exutoires	25
2.7.3 Les aquifères secondaires.....	25
2.7.3.1 La nappe côtière	25
2.7.3.2 La plaine des Bordjias	25
2.8 Conclusion.....	26

Chapitre 3: Systèmes d'Information Géographique

3.1 Introduction	28
3.2 Historique.....	28
3.3 Définition d'un SIG	29
3.3.1 Information géographique.....	30
3.3.2 Base de données géographiques	30
3.4 Composantes et fonctionnalités d'un SIG	31
3.4.1 Composantes d'un SIG.....	31
3.4.2 Fonctionnalités d'un SIG	31
3.5 Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG	32
3.5.1 Mode vecteur.....	33
3.5.2 Mode raster.....	33
3.5.3 Conversions du mode vecteur au mode raster.....	33
3.6 Notion de couches (niveaux, strates ou layers)	34
3.7 Avantages et inconvénients des SIG	34
3.7.1 Avantages	35
3.7.2 Inconvénients	35
3.8 Logiciels SIG.....	35
3.8.1 Présentation du logiciel ArcGIS	36
3.8.1.1 Naissance et historique d'ArcGIS	36
3.8.1.2 Composants d'ArcGIS	36
3.8.2 Outils de superposition dans ArcGIS	37
3.8.2.1 Notion de superposition des couches (overlay).....	37
3.8.2.2 Notion de superposition floue dans ArcGIS.....	38
3.9 Système d'Aide à la Décision (SAD)	38
3.9.1 Définition	38
3.9.2 Caractéristiques d'un Système d'Aide à la Décision.....	38
3.10 Système d'Aide à la Décision Spatial (SADS).....	39
3.10.1 Définition	39
3.10.2 Caractéristiques d'un Système d'Aide à la Décision Spatial.....	39
3.11 Conclusion.....	40

Chapitre 4: Concepts de la logique floue

4.1 Introduction	41
4.2 Imperfections dans les connaissances	41
4.2.1 Différents types d'imperfections dans les connaissances.....	41
4.2.2 Modélisation des imperfections dans les connaissances	42
4.3 Concepts de base de la logique floue	44
4.3.1 Historique et définitions	44

4.3.2 Sous-ensembles flous	44
4.3.2.1 Définition d'un sous-ensemble flou.....	45
4.3.2.2 Fonction d'appartenance	46
4.3.2.3 Caractéristiques des sous-ensembles flous.....	49
4.3.2.4 Opérations de base sur les sous-ensembles flous	50
4.3.2.5 Variables linguistiques	52
4.4 Classement de nombres flous	53
4.4.1 Méthodes de classement de nombres flous	53
4.4.2 Classement des nombres flous par l'ensemble maximisant et l'ensemble minimisant.....	55
4.4.3 Aggrégation des évaluations floues et calcul de l'indice de pertinence flou F_i	56
4.5 Opérateurs flous pour l'agrégation de sous-ensembles flous.....	57
4.6 Conclusion.....	58

Chapitre 5: Interpolation spatiale & Krigeage flou

5.1 Introduction	59
5.2 Caractéristiques des méthodes d'interpolation spatiale.....	59
5.2.1 Méthodes déterministes.....	59
5.2.1.1 Méthodes déterministes globales.....	59
5.2.1.2 Méthodes déterministes locales.....	60
.....	61
5.2.2 Méthodes géostatistiques.....	62
5.2.2.1 Semi-variogramme expérimental	62
5.2.2.2 Modèles de variogramme théorique	63
5.3 Interpolation par krigeage	64
5.4 Méthodes de krigeage.....	65
5.4.1 Krigeage simple.....	65
5.4.2 Krigeage ordinaire.....	65
5.4.3 Krigeage universel.....	65
5.5 krigeage flou.....	66
5.5.1 Modélisation de l'incertitude dans le krigeage flou	66
5.5.2 Variogramme flou	66
.....	67
5.5.3 Calcul des limites z_0 (valeur minimale) et z_0 (valeurs maximales) de l'interpolation floue...	67
5.6 Conclusion.....	68

DEUXIEME PARTIE: CONTRIBUTIONS

Avant propos	69
--------------------	----

Chapitre 6: Interpolation floue des données

6.1 Introduction	70
6.2 Interpolation floue de la piézométrie et carte rabattement	70
6.2.1 Définition et contexte	70
6.2.2 Analyse exploratoire des données piézométriques par l'extension 'GA' d'ArcGis	71
6.2.2.1 Analyse exploratoire de la piézométrie par histogramme	72
6.2.2.2 Analyse exploratoire de la piézométrie par les diagrammes de Voronoï.....	73
6.2.3 Analyse de la piézométrie par le nuage variographique.....	74
6.2.3.1 Nuage variographique omnidirectionnel	74

6.2.3.2 Localisation de valeurs aberrantes dans le nuage variographique.....	75
6.2.4 Stationnarité et Analyse de tendance dans les niveaux piézométriques.....	76
6.2.4.1 Transformation des données brutes en données normalement distribuées.....	76
6.2.4.2 Analyse de tendance avec ArcGis.....	77
6.2.5 Variogramme expérimental omnidirectionnel.....	78
6.2.6 Anisotropie et variogrammes expérimentaux directionnels.....	79
6.2.7 Variogramme expérimental directionnel des résidus.....	81
6.2.8 Modèle théorique.....	82
6.2.9 Mise en œuvre du Krigeage flou.....	82
6.2.9.1 Paramètres du variogramme flou.....	82
6.2.9.2 Carte d'interpolation floue de la piézométrie du plateau de Mostaganem.....	83
6.2.9.3 Calcul des limites minimales et maximales de l'interpolation floue.....	84
6.2.9.4 Largeur des estimations floues.....	85
6.2.10 Validation croisée.....	86
6.2.11 Rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem.....	87
6.3 Interpolation floue du critère débit.....	88
6.3.1 Définition.....	88
6.3.2 Carte d'interpolation floue du débit.....	89
6.3.3 Limites Min et Max de l'interpolation floue.....	91
6.4 Interpolation floue du critère profondeur totale de la formation Aquifère.....	92
6.4.1 Définition.....	92
6.4.2 Carte d'interpolation floue de la profondeur.....	92
6.4.3 Limites Min et Max de l'interpolation floue.....	94
6.5 Conclusion.....	95

Chapitre 7: Analyse SIG et carte des sites potentiels

7.1 Introduction.....	96
7.2 Organigramme de l'approche SIG.....	96
7.3 Collecte des données.....	97
7.3.1 Paramètres hydrodynamiques.....	97
7.3.1.1 Transmissivité de la nappe du plateau de Mostaganem.....	97
7.3.1.2 Coefficient d'emmagasinement de la nappe.....	99
7.3.1.3 Perméabilité de la nappe du plateau de Mostaganem.....	100
7.3.2 Rabattement de la nappe.....	102
7.3.3 Débit.....	102
7.3.4 Profondeur de l'aquifère.....	102
7.3.5 Recharge.....	103
7.3.6 Vulnérabilité.....	103
7.3.7 Qualité de l'eau.....	103
7.3.8 Sources potentielles de contamination.....	103
7.4 Reclassification des couches de données.....	104
7.5 Création des cartes de contraintes et zones tampons.....	104
7.6 Carte préliminaire de sites potentiels.....	105
7.7 Carte des sites potentiels de captage d'eau et sa table attributaire.....	106
7.8 Conclusion.....	108

Chapitre 8: Méthode multicritère floue (MCFAD) et carte décisionnelle

8.1 Introduction	109
8.2 Organigramme de la méthode Multi-Critère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD)	109
8.2.1 Modélisation des critères flous par variables linguistiques et nombres flous	110
8.2.2 Notation floue des sites potentiels	114
8.2.3 Agrégation des notations floues des experts et calcul de l'indice flou "F _i "	116
8.2.4 Classement des sites potentiels selon leur indice F _i	117
8.2.5 Carte de décision finale et interprétation	117
8.3 Validation des résultats	120
8.3.1 Analyse de robustesse	120
8.3.2 Comparaison avec les résultats du modèle mathématique de l'ANRH	121
8.3.2.1 Données collectées pour le modèle conceptuel	121
8.3.2.2 Démarche adoptée par SOGREAH	122
8.3.2.3 Hypothèses du scénario de référence	122
8.3.2.4 Résultats du scénario de référence	122
8.3.2.5 Comparaison des résultats avec le rabattement du scénario de référence	124
8.4 Conclusion	125
Conclusion générale	126

TROISIEME PARTIE: ANNEXES

Annexe A: Etude de la recharge potentielle du plateau de Mostaganem

A.1 Introduction	141
A.2 Recharge des nappes souterraines	141
A.2.1 Définition de la recharge	141
A.2.2 Types de recharge	142
A.3 Méthodes d'estimation de la recharge	142
A.3.1 Approche de bilan hydrique	142
A.3.2 Approche par infiltrométrie et lysimétrie	143
A.3.3 Approche par le suivi du niveau de la nappe	143
A.3.4 Approche par hydrogramme	143
A.3.5 Approche analytique	143
A.3.6 Approche de traçage	143
A.3.7 Approche par modélisation numérique en zone non saturée	144
A.3.8 Approche par modélisation numérique en zone saturée	144
A.4 Importance de l'estimation de la recharge	146
A.5 Application au plateau de Mostaganem	146
A.5.1 Méthodologie adoptée	146
A.5.2 Facteurs influençant la recharge	147
A.5.3 Etude des facteurs régissant la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem	149
A.5.3.1 Etude du facteur sol	149
A.5.3.2 Etude du facteur lithologie	150
A.5.3.3 Etude du facteur pente	151
A.5.3.4 Etude du facteur réseau hydrographique	153
A.5.3.5 Etude du facteur couvert végétal et occupation du sol (CV & OS)	153
A.5.4 Evaluation des cotes des facteurs régissant la recharge	155

A.5.5 Pondération des facteurs régissant la recharge	156
A.5.6 Indices d'infiltration et taux de contribution des facteurs dans la recharge	157
A.5.7 Carte synthèse de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem	157
A.5.7.1 Classes d'infiltration	157
A.5.7.2 Volume précipité	158
A.5.7.3 Volume infiltré	159
A.5.7.4 Carte synthèse du plateau de Mostaganem.....	159
A.6 Validation des résultats	162
A.7 Conclusion.....	162

Annexe B: Etude de la vulnérabilité de la nappe du plateau de Mostaganem à la pollution par la méthode DRASTIC

B.1 Introduction	163
B.2 Définition.....	163
B.3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère	164
B.4 Description de la méthode DRASTIC	165
B.4.1 Notation des paramètres DRASTIC	166
B.4.2 Calcul de l'indice DRASTIC de Pollution "DPI"	167
B.5 Validation de la carte de vulnérabilité.....	168
B.6 Application de la méthode DRASTIC au plateau de Mostaganem	168
B.6.1 Sources de données relatives aux paramètres DRASTIC	168
B.6.2 Elaboration des couches thématiques des paramètres DRASTIC	169
B.6.2.1 Epaisseur de la zone non saturée (D).....	169
B.6.2.2 Recharge (R).....	170
B.6.2.3 Milieu Aquifère (A).....	171
B.6.2.4 Sol (S).....	172
B.6.2.5 Topographie (T).....	173
B.6.2.6 Impact de la zone vadose (I).....	174
B.6.2.7 Conductivité hydraulique de l'aquifère (C).....	175
B.6.3 Calcul de l'indice DRASTIC "DPI"	176
B.6.4 Carte de vulnérabilité du plateau de Mostaganem.....	177
B.7 Comparaison du degré de vulnérabilité à la pollution avec la répartition spatiale des nitrates	179
B.8 Carte des zones à haut risque de pollution sur le plateau de Mostaganem	181
B.9 Conclusion	182

Annexe C: Etude de la qualité des eaux souterraines du plateau de Mostaganem

C.1 Introduction	183
C.2 Analyse des balances ioniques pour le contrôle de la cohérence des analyses hydro-chimiques.	184
C.3 Analyse statistique des données hydro-chimiques par L'ACP.....	186
C.3.1 Résultats des statistiques élémentaires	186
C.3.2 Matrice de corrélation.....	187
C.3.3 Etude des variables	188
C.3.4 Etude des individus.....	189
C.4 Evolution spatiale des paramètres chimiques des eaux souterraines	190
C.4.1 Minéralisation.....	190
C.4.2 Teneur en Calcium (Ca)	190
C.4.3 Teneur en Magnésium (Mg)	191

C.4.4 Teneur en Sodium (Na)	192
C.4.5 Teneur en Potassium (K)	192
C.4.6 Teneur en Chlorure (Cl)	193
C.4.7 Teneur en Sulfate (SO ₄)	194
C.4.8 Teneur en Bicarbonate (HCO ₃).....	194
C.4.9 Teneur en Nitrate (NO ₃).....	195
C.5 Caractères physiques des eaux souterraines	196
C.5.1 Potentiel hydrogène (PH)	196
C.5.2 Conductivité.....	197
C.5.3 Résidu sec	198
C.6 Etude des rapports caractéristiques.....	199
C.6.1 Rapport rSO_4^{2-} / rCl^-	199
C.6.2 Rapport rNa^+ / rCl^-	200
C.6.3 Rapport rMg^{++} / rCa^{++}	201
C.7 Classification hydrochimique	202
C.7.1 Représentation par le diagramme de Schöeller- Berkaloff.....	202
C.7.2 Représentation par le digramme de Piper	205
C.7.3 Carte des faciès	207
C.7.4 Interprétation	211
C.8 Qualité de l'eau.....	211
C.8.1 Potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine	211
C.8.2 Qualité de l'eau destinée à l'irrigation	212
C.8.2.1 Salinité	214
C.8.2.2 Toxicité due au Sodium	214
C.8.2.3 Toxicité due au Chlorure	214
C.9 Conclusion	216
Annexe D : Carte hydrogéologique interprétative	Erreur ! Signet non défini.17
Annexe E : Analyses chimiques des eaux souterraines du plateau de Mostaganem...Erreur ! Signet non défini.8	
Annexe F : Cartes des contraintes (plateau de Mostaganem).....	Erreur ! Signet non défini.20

Liste des figures

Figure 1. 1 . Cycle hydrologique (Myrand D., 2008).....	6
Figure 1. 2. Aquifère poreux.....	7
Figure 1. 3. Aquifère fissuré.....	7
Figure 1. 4. Aquifère karstique.....	7
Figure 1. 5. Nappe libre.....	8
Figure 1. 6. Nappe captive.	8
Figure 1. 7. Nappe semi-captive.....	8
Figure 1. 8. Nappe double (captive&libre).....	8
Figure 1. 9. Aquifères de l'Algérie (Demmak, 2012).....	11
Figure 1. 10. Les eaux souterraines du Sahara septentrional (Demmak, 2012).	12
Figure 2. 1. Localisation géographique du plateau de Mostaganem	13
Figure 2. 2. Hydrographie du plateau de Mostaganem.	15
Figure 2. 3. Carte géologique du plateau de Mostaganem (DEMRRH, 1978)	17
Figure 2. 4. Bloc diagramme de la région de Ain Nouissy (Gentil L., 1903).	18
Figure 2. 5. Coupe du Trias d'Ain Nouissy (Gentil L., 1903).	18
Figure 2. 6. Coupe géologique du plateau de Mostaganem.	21
Figure 2. 7. Log litho-stratigraphique synthétique (source: ANRH, 2006). Echelle:1/10.000.....	22
Figure 2. 8. Carte structurale du plateau de Mostaganem (Baiche, 1993)	23
Figure 3. 1. Composantes d'un SIG	31
Figure 3. 2. Fonctionnalités d'un SIG.....	32
Figure 3. 3. Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG.	33
Figure 3. 4. Passage du mode vecteur au mode raster.....	34
Figure 3. 5. Exemple de couches dans un SIG.....	34
Figure 3. 6. Vue sommaire de l'environnement d'ArcMap.	37
Figure 4. 1. Exemple de sous-ensemble flou.....	46
Figure 4. 2. Fonction d'appartenance trapézoïdale	47
Figure 4. 3. Fonction d'appartenance triangulaire	47
Figure 4. 4. Fonction d'appartenance sigmoïde	48
Figure 4. 5. Fonction d'appartenance gaussienne	48
Figure 4. 6. Fonction d'appartenance singleton	48
Figure 4. 7. Notions caractéristiques d'un sous-ensemble flou.....	49
Figure 4. 8. Les deux sous-ensembles flous considérés	51
Figure 4. 9. Intersection de deux ensembles flous A et B	51
Figure 4. 10. Union de deux sous-ensembles flous A et B.....	51
Figure 4. 11. Exemple de variable linguistique (V_1, X, T_v).....	52
Figure 4. 12. Variable linguistique (V_2, X, TV).....	53
Figure 5. 1. Exemple de polygones de Thiessen.	60
Figure 5. 2. Exemple de découpage en cellules.	60

Figure 5. 3. Triangulation de Delaunay.....	61
Figure 5. 4. Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW).....	61
Figure 5. 5. Exemple d'un variogramme expérimental (empirique).....	63
Figure 5. 6. Exemple d'un variogramme théorique.	63
Figure 5. 7. Variogramme flou estimé (valeur minimale, modale et maximale) basé sur un variogramme empirique (points noirs).....	67
Figure 6. 1. Carte de situation des points forages et puits dans le plateau de Mostaganem. (Source de données: DRE Mostaganem, 2016).....	71
Figure 6. 2. Histogramme et statistiques du niveau piézométrique.....	73
Figure 6. 3. Diagramme de Voronoi par la méthode 'Mean'.	74
Figure 6. 4. Diagramme de Voronoi par la méthode 'Cluster'.	74
Figure 6. 5. Nuage variographique Omnidirectionnel de la piézométrie.	75
Figure 6. 6. Identification des valeurs piézométriques aberrantes dans le nuage variographique omnidirectionnel.....	76
Figure 6. 7. Transformation des données brutes en données normalement distribuées.	77
Figure 6. 8. Identification d'une tendance dans les niveaux piézométriques selon la direction 270°	78
Figure 6. 9. Variogramme expérimental omnidirectionnel.	78
Figure 6. 10. Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0°(idem 180°), 45°(idem 225°), 90°(idem 270°) et 135°(idem 315°).	79
Figure 6. 11. Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0°, 45°, 90° et 135° et variance.	80
Figure 6. 12. Carte de variogramme illustrant l'anisotropie dans l'ensemble de données.	81
Figure 6. 13. Variogramme directionnel des résidus selon la direction 90° et une portée de 20km.	81
Figure 6. 14. Variogramme expérimental directionnel des résidus (points noirs) et modèles ajustés. .	82
Figure 6. 15. Variogramme flou sphérique estimé (valeur minimale, modale et maximale) ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des niveaux piézométriques.....	83
Figure 6. 16. Valeurs modales de la surface floue du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).....	84
Figure 6. 17. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues du plateau de Mostaganem.	85
Figure 6. 18. Largeurs des estimations floues de $z^0 - z^0$ du plateau de Mostaganem.	85
Figure 6. 19. Carte de situation des points de validation.....	86
Figure 6. 20. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés et les valeurs piézométriques modales floues estimées.....	86
Figure 6. 21. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés avec les largeurs des estimations floues.....	87
Figure 6. 22. Carte piézométrique du plateau de Mostaganem (Gauchez., 1981).....	88
Figure 6. 23. Carte de Rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem (Période 1981-2016).....	88
Figure 6. 24. Distribution spatiale des débits sur le plateau de Mostaganem.....	89
Figure 6. 25. Variogramme flou exponentiel estimé (valeur minimale, modale et maximale) et ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des débits.	90
Figure 6. 26. Valeurs modales de la surface floue des débits du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).....	90
Figure 6. 27. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues des débits du plateau de Mostaganem.	91

Figure 6. 28. Largeurs des estimations floues de $z^0 - z^0$ des débits du plateau de Mostaganem.....	91
Figure 6. 29. Distribution spatiale des profondeurs sur le plateau de Mostaganem.....	92
Figure 6. 30. Variogramme flou sphérique estimé (valeur minimale, modale et maximale) et ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des débits.....	93
Figure 6. 31. Valeurs modales de la surface floue des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).....	93
Figure 6. 32. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.....	94
Figure 6. 33. Largeurs des estimations floues de $z^0 - z^0$ des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.....	94
Figure 7. 1. Organigramme de l'approche SIG.....	96
Figure 7. 2. Transmissivité de la formation aquifère.....	98
Figure 7. 3. Carte de transmissivité de Y. LEROLLE issue de la carte hydrogéologique.....	99
Figure 7. 4. Carte de transmissivité. (Source : ANRH, 2009).....	99
Figure 7. 5. Carte du coefficient d'emmagasinement du plateau de Mostaganem (selon le modèle mathématique de Lerolle Y., 1973).....	100
Figure 7. 6. Carte de perméabilité du plateau de Mostaganem. (Source : ANRH, 2006).....	102
Figure 7.7. Carte de coefficient "S" reclassé.....	104
Figure 7.8. Carte de débit reclassé.....	104
Figure 7. 9. Carte de transmissivité reclassée.....	104
Figure 7.10. Carte de la recharge potentielle reclassée.....	104
Figure 7. 11. Cartes de contraintes et zones tampons.....	105
Figure 7. 12. Carte préliminaire de sites potentiels dans le plateau de Mostaganem.....	106
Figure 7. 13. Carte de sites potentiels de forages de captage d'eau.....	107
Figure 7. 14. Attributs relatifs à la carte des sites potentiels.....	108
Figure 8. 1. Description du processus de prise de décision.....	109
Figure 8. 2. Organigramme de la méthode MCFAD.....	110
Figure 8. 3. Modélisation de la variable linguistique (V, X, T _v).....	111
Figure 8. 4. Modélisation du critère rabattement.....	111
Figure 8. 5. Modélisation du critère Débit " D (l/s) ".....	112
Figure 8. 6. Modélisation du critère profondeur de l'aquifère "pf (m)".....	112
Figure 8. 7. Modélisation du critère recharge.....	112
Figure 8. 8. Modélisation du critère coefficient d'emmagasinement "s".....	113
Figure 8. 9. Modélisation du critère Transmissivité " T (m ² /s) ".....	113
Figure 8. 10. Modélisation du critère qualité de l'eau.....	114
Figure 8. 11. Carte de décision finale et classement de sites potentiels de forage d'eau.....	118
Figure 8. 12. Simulation de Monte Carlo (Analyse de robustesse).....	120
Figure 8. 13. Scénario 1 (référence) : Piézométrie simulée en 2020 (ANRH, 2009).....	123
Figure 8. 14. Scénario 1 (référence) : Rabattement de la nappe entre les piézométries simulées en septembre 2004 et septembre 2020. (ANRH, 2009).....	123
Figure 8. 15. Comparaison des résultats avec le rabattement du scénario de référence.....	124
Figure A. 1. Principaux facteurs régissant l'infiltration.....	147

Figure A. 2. Carte thématique du facteur « sol ».....	150
Figure A. 3. Carte thématique du facteur « Lithologie ».....	151
Figure A. 4. Carte thématique du facteur « pente ».....	152
Figure A. 5. Carte thématique du facteur « réseau hydrographique ».....	153
Figure A. 6. Carte thématique du facteur « CV & OS »	155
Figure A. 7. Effets entre les facteurs régissant la recharge	157
Figure A. 8. Carte synthèse de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem.....	161
Figure B. 1. Paramètres DRASTIC	165
Figure B. 2. Epaisseur de la zone non saturée (D).	170
Figure B. 3. Classes de recharge dans le plateau de Mostaganem	171
Figure B. 4. Lithologie de l'aquifère du plateau de Mostaganem.....	172
Figure B. 5. Carte de sol du plateau de Mostaganem.....	172
Figure B. 6. Carte des pentes (en %) du plateau de Mostaganem.....	173
Figure B. 7. Lithologie de la zone vadose du plateau de Mostaganem.....	175
Figure B. 8. Carte de perméabilité du plateau de Mostaganem.....	176
Figure B. 9. Organigramme de calcul et d'établissement de la carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.....	177
Figure B. 10. Carte de vulnérabilité du plateau de Mostaganem	178
Figure B. 11. Comparaison et Corrélation de la distribution spatiale des nitrates et les classes de vulnérabilité dans le plateau de Mostaganem.....	180
Figure B. 12. Combinaison de la carte des sources de pollution dans le plateau de Mostaganem et les classes de vulnérabilité à la pollution	181
Figure C. 1. Localisation des points de prélèvement sur le plateau de Mostaganem.....	184
Figure C. 2. Représentation des balances ioniques calculées des points d'eaux	185
Figure C. 3. Cercle de corrélation des éléments chimiques.	189
Figure C. 4. Graphe des individus (forages et puits).....	189
Figure C. 5. Carte d'isoteneur en Minéralisation dans le plateau de Mostaganem.....	190
Figure C. 6. Carte d'isoteneur en Calcium dans le plateau de Mostaganem.....	191
Figure C. 7. Carte d'isoteneur en Magnésium dans le plateau de Mostaganem	191
Figure C. 8. Carte d'isoteneur en Sodium dans le plateau de Mostaganem.....	192
Figure C. 9. Carte d'isoteneur en Potassium dans le plateau de Mostaganem.....	193
Figure C. 10. Carte d'isoteneur en Chlorure dans le plateau de Mostaganem.....	194
Figure C. 11. Carte d'isoteneur en Sulfate dans le plateau de Mostaganem.....	195
Figure C. 12. Carte d'isoteneur en Bicarbonate dans le plateau de Mostaganem.....	195
Figure C. 13. Carte d'isoteneur en Nitrate dans le plateau de Mostaganem.....	196
Figure C. 14. Variation des Nitrates dans le plateau de Mostaganem.....	196
Figure C. 15. Carte d'isoteneur en pH dans le plateau de Mostaganem	197
Figure C. 16. Carte d'isovaleur en conductivité dans le plateau de Mostaganem	198
Figure C. 17. Carte d'isoteneur en résidu sec dans le plateau de Mostaganem	199
Figure C. 18. Carte d'isorange de r_{SO4-2} / r_{Cl-}	199
Figure C. 19. Carte d'isorange de r_{Na+} / r_{Cl-}	200
Figure C. 20. Carte d'isorange de $r_{Mg^{++}} / r_{Ca^{++}}$	201
Figure C. 21. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff (partie1).....	203

Figure C. 22. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff (partie2).....	204
Figure C. 23. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Piper	205
Figure C. 24. Carte des faciès chimiques sur le plateau de Mostaganem.	210
Figure C. 25. Carte des points dont la potabilité est nettement diminuée	212
Figure C. 26. Carte des points d'eau à forte salinité	215
Figure C. 27. Carte des points d'eau à forte restriction pour l'irrigation de surface due à la toxicité au sodium.....	215
Figure C. 28. Carte des points d'eau à forte restriction pour l'irrigation de surface due à la toxicité au chlorure.	216
Figure D. 1. Carte hydrogéologique interprétative publiée par l'ANRH.....	217
Figure F. 1. Carte de contrainte des cours d'eaux ponctuels	220
Figure F. 2. Carte de contrainte des cours d'eaux linéaires	220
Figure F. 3. Carte de contrainte liée au réseau routier.....	221
Figure F. 4. Carte de contrainte relative au pipe-line	221
Figure F. 5. Carte de contrainte relative aux zone à risque (stations de service, usine,...).....	222

Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Tableau climatique de MOSTAGANEM (climate-data.org)	16
Tableau 2. 2. Formations à potentiel hydrogéologique au niveau du plateau de Mostaganem (D.E.M.R.H, 1978).	26
Tableau 6. 1. Paramètres du variogramme flou sphérique de la piézométrie.....	83
Tableau 6. 2. Paramètres du variogramme flou exponentiel relatifs au critère débit.	89
Tableau 6. 3. Paramètres du variogramme flou sphérique du critère profondeur de l'aquifère.....	92
Tableau 7. 1. Quelques ordres de grandeurs de coefficients de perméabilité	101
Tableau 7. 2. Critères de proximité et zones tampons.....	105
Tableau 8. 1. Notations floues des critères selon deux experts.	115
Tableau 8. 2. Notations floues des poids des différents critères selon deux experts.....	115
Tableau 8. 3. Notations floues des sites potentiels selon le premier expert.	116
Tableau 8. 4. Notations floues des sites potentiels selon le deuxième expert.	116
Tableau 8. 5. Indices de pertinence flous des sites potentiels.	117
Tableau 8. 6. Classement des sites potentiels.....	117
Tableau A. 1. Inventaire d'études et méthodes d'estimation de la recharge faites au cours des 20 dernières années (Huet M., 2015).	145
Tableau A. 2. Méthodes d'estimation de la recharge utilisée par les auteurs du Tableau B.1	146
Tableau A. 3. Description hydrogéologique des facteurs régissant la recharge.....	148
Tableau A. 4. Ordres de grandeur de la perméabilité dans différents sols (d'après Musy et Soutter (1991)	149
Tableau A. 5. Classification des types de sol du plateau de Mostaganem	149
Tableau A. 6. Différentes classes de lithologie du plateau de Mostaganem	151
Tableau A. 7. Classification des pentes selon leur influence sur l'infiltration	152
Tableau A. 8. Classes de densité de drainage.....	153
Tableau A. 9. Récapitulation des différentes classes du CV & OS.....	155
Tableau A. 10. Echelle des cotes attribuées aux classes des facteurs	155
Tableau A. 11. Valeurs des cotes attribuées aux facteurs régissant la recharge.....	156
Tableau A. 12. Indices d'infiltration et taux de contribution des facteurs sur la recharge.....	157
Tableau A. 13. Classes d'infiltration du plateau de Mostaganem	158
Tableau A. 14. Stations pluviométriques du secteur de Mostaganem.....	158
Tableau A. 15. Volume précipité, volume infiltré et lame infiltrée dans la zone d'étude	159
Tableau B. 1. Tour d'horizon des méthodes de vulnérabilité. (Allier et al, 2008)	164
Tableau B. 2. Paramètres du modèle DRASTIC.....	166

Tableau B. 3. Notations accordées aux paramètres DRASTIC (Lallemand-Barrès., 1994).	167
Tableau B. 4. Classes de vulnérabilité en fonction de l'indice DPI.....	168
Tableau B. 5. Sources de données relatives aux paramètres DRASTIC	169
Tableau B. 6. Classification et notation du paramètre profondeur (Epaisseur de la zone non saturée). ...	169
Tableau B. 7. Classification et notation du paramètre recharge.....	170
Tableau B. 8. Classification et notation du paramètre lithologie de l'aquifère	171
Tableau B. 9. Classification et notation du paramètre sol.....	173
Tableau B. 10. Classification et notation du paramètre topographie	173
Tableau B. 11. Classification et notation du paramètre 'Zone Vadose'	174
Tableau B. 12. Classification et notation du paramètre perméabilité.....	175
Tableau B. 13. Classification de la vulnérabilité du plateau de Mostaganem.....	177
Tableau C. 1. Calcul des moyennes et des écarts-types de la série.....	187
Tableau C. 2. Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	188
Tableau C. 3. Rapports caractéristiques des eaux des points de prélèvement.....	201
Tableau C. 4. Résultats des analyses chimiques en r %.....	206
Tableau C. 5. Formules caractéristiques et faciès chimiques de l'eau.....	208
Tableau C. 6. Normes de potabilité de l'eau (Source: O.M.S).....	211
Tableau C. 7. Restrictions des eaux d'irrigation d'après (Ayers R.S. et al. 1985).....	212
Tableau C. 8. Restrictions des eaux d'irrigation dans le plateau de Mostaganem	214
Tableau E. 1. Analyses chimiques des échantillons d'eaux souterraines (mg/l, source : ANRH 1993-2015)	218
Tableau E. 2. Balances ioniques des échantillons d'eau en %	219

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

CONTEXTE & PROBLEMATIQUE

Les problèmes d'eau souterraine en Algérie sont une préoccupation croissante. Au début des années 2000, la sécheresse a entraîné la réorientation de l'eau des barrages vers les villes pour répondre aux pénuries d'eau potable. De nombreux agriculteurs voient alors, leurs allocations d'eau de barrage réduites ou supprimées, et commencent à creuser des puits et des forages pour extraire intensivement les eaux souterraines, menaçant ainsi leur durabilité et leur qualité.

L'utilisation intensive de ces ressources naturelles, en particulier le captage des eaux souterraines, a conduit à un besoin accru de concevoir des mécanismes de gouvernance, de gestion et d'aide à la décision aux niveaux local et national.

Le choix de site d'implantation de forage de captage d'eau exige la connaissance de moyens et de méthodes pour construire des systèmes de sélection et d'aide à la décision spatiale efficaces. Dans la littérature, plusieurs méthodes et approches sont utilisées pour développer des Systèmes d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) (Mcintyre and Parfitt, 1998; Prével et al., 2003; Pennober et al., 2004; Dixon B., 2005; Chakhar, 2006; Malczewski, 2006; Chang et al., 2008; Younsi et al., 2009; Kêdowidé C.M.G., 2010; Greene et al., 2011 ; Zarghami and Szidarovszky, 2011; Abdalla, 2012; Belkhiri, 2012; Lidouh, 2013).

La mise en place d'un SADS nécessite, la définition de plusieurs critères contradictoires dont l'importance n'est pas la même, il nécessite une quantité considérable de données géographiques quantitatives et qualitatives. C'est une approche complexe qui dépend des moyens de connaissance et d'accès à l'information. L'information dont on parle ici est un élément clé de l'aide à la décision. Elle est obtenue à travers des processus de collecte, d'analyse et d'échange de données qui permettent aux acteurs, concernés par la décision, de construire, renforcer ou modifier leurs préférences.

Comme la plupart des systèmes liés aux problèmes territoriaux, les SADS dédiés à la gestion et la gouvernance des eaux souterraines sont modélisables mathématiquement. Seulement, les connaissances et les informations dont on veut faire la modélisation sont d'une part de sources et de types variés et, d'autre part, souvent subjectives, imprécises et incertaines, voire même vagues.

Prenons l'exemple d'un technicien désireux de tester la qualité de l'eau pour l'irrigation. On peut se demander à quelle gamme de mesure (à quel intervalle) appartient le qualificatif « bonne ». La réponse est souvent subjective. De plus, la fiabilité des appareils d'analyse est à prendre en considération. Ainsi, la mesure du PH est incertaine. On voit aussi, apparaître la difficulté

d'interprétation, de variables linguistiques et de sous ensembles flous comme : vulnérabilité moyenne, faible, assez faible, ..., et donc du traitement des données entachées d'incertitudes. En conséquence de quoi, le processus de prise de décision devient difficile.

CONTRIBUTION

Les méthodes multicritères basées sur la logique floue permettent de faciliter l'interprétation de variables linguistiques et de modéliser les incertitudes et les imperfections qui entachent les connaissances d'un SADS. Les outils d'aide à la décision tels que les systèmes d'information géographique (SIG) permettent de relever les défis de la connaissance de la ressource d'un point de vue à la fois quantitatif et qualitatif. Les SIG qui allient la cartographie et la gestion de base de données, offrent des possibilités d'analyse spatiale, de manipulation et représentation optimisée de données hétérogènes. Ainsi on obtient des résultats qui sont en parfaite adéquation avec les objectifs des décideurs impliqués dans le processus décisionnel.

C'est dans ce cadre, que nous proposons dans cette étude d'élaborer un SADS en environnement imprécis pour l'implantation de sites de forage de captage d'eau.

Le SADS, développé dans cette étude, consiste en une combinaison d'une analyse SIG et d'une méthode multicritère floue. Il suit les étapes suivantes :

1. Recherche bibliographique exhaustive pour identifier les critères à impliquer dans le processus de sélection des sites potentiels de captage d'eau [(Diallo S., 2007), (Lachassagne P. et al., 2000), (Jeanneau J. et al., 2004), (Coulibaly T., 2004), (CICR, 2012), (Myrand D., et al., 2008), (Danert, K. 2009)]. Les principaux critères identifiés sont: le rabattement de la nappe, la transmissivité, le coefficient d'emménagement, le débit, la profondeur totale de l'aquifère, la vulnérabilité à la pollution, la recharge potentielle de la nappe et la qualité des eaux souterraines.
2. Collecte des données disponibles (en format papier), telles que: transmissivité et coefficient d'emménagement, et numérisation avec un logiciel SIG.
3. Elaboration de couches thématiques géoréférencées (carte vulnérabilité, carte synthèse de la recharge et détermination de la qualité de l'eau en chaque puits ou forage de la zone d'étude) à travers d'études détaillées, menées sur les critères "vulnérabilité", "recharge potentielle" et "qualité des eaux".
4. Interpolation par krigeage flou des critères intervenant directement dans l'analyse SIG, tels que le rabattement, le débit et la profondeur de l'aquifère. Ce processus d'interpolation flou fait intervenir les nombres flous triangulaires pour la modélisation des paramètres du variogramme théorique des données. Cette modélisation fournit, en plus des prédictions, des informations sur l'incertitude en chaque emplacement.

5. Sélection des sites potentiels de captage d'eau par une analyse géospatiale moyennant l'outil SIG. Néanmoins, à ce stade de l'étude, le décideur est incapable de faire un choix pour la sélection du meilleur site de forage en raison du grand nombre de critères, du grand nombre de sites potentiels et de leurs évaluations imprécises par rapport aux critères.
6. Classement des sites potentiels de captage avec une méthode MultiCritère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD). Cette méthode est développée sous l'environnement MATLAB, elle est basée sur le concept de la théorie des sous-ensembles flous.

Au final, une carte décisionnelle présentant une classification des sites de forages est établie. L'application de cette étude est faite sur le plateau de Mostaganem dans la région Nord-Ouest de l'Algérie.

ORGANISATION DU DOCUMENT

Outre l'introduction générale et la conclusion générale, ce document est organisé en trois grandes parties:

La première partie présente des notions générales sur les concepts des eaux souterraines et le contexte géologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude. Les concepts et méthodes de traitement utilisés dans cette étude sont également décrits. Cette partie est scindée en cinq chapitres.

La deuxième partie décrit notre contribution dans ce travail de recherche. Cette partie comprend trois chapitres.

La troisième partie présente sous forme d'annexes l'étude de la vulnérabilité à la pollution, l'étude de la recharge et l'étude de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

Première partie: Notions générales

Chapitre 1: Principes fondamentaux des eaux souterraines

Ce chapitre donne un aperçu général sur les concepts de base des eaux souterraines et leur exploitation via les ouvrages de captages. Il permet, en outre, d'avoir une idée sur le secteur de l'eau en Algérie et de répertorier les principaux aquifères qui caractérisent le pays.

Chapitre 2: Contexte géologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude

Le plateau de Mostaganem est la zone choisie pour mettre en œuvre notre projet de recherche. Le chapitre 2 décrit les aspects géologiques, climatologiques et hydrogéologiques de cette zone d'étude.

Chapitre 3: Systèmes d'Information Géographique

Ce chapitre présente les Systèmes d'Information Géographique (SIG) avec leur capacité de gestion, d'analyse et de traitement de données à références spatiales. Il permet de découvrir les apports et les limites des SIG en matière d'aide à la décision. A la fin de ce chapitre nous présentons le logiciel SIG utilisé dans le cadre de cette étude, ainsi que des notions générales sur les systèmes d'aide à la décision spatiaux.

Chapitre 4: Concepts de la logique floue

Ce chapitre se propose de rappeler le concept de base de la logique floue et fait le point sur quelques méthodes de classement floues. Il s'agit surtout de présenter la méthode de classement floue, utilisée dans ce projet de recherche.

Chapitre 5: Interpolation spatiale & Krigeage flou

Ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts de l'interpolation spatiale des données géographiques. Les méthodes géostatistiques d'interpolation spatiale, notamment les méthodes de krigeage, sont décrites dans ce chapitre. L'approche pour la prédiction des données spatiales par krigeage flou est, particulièrement, décrite dans ce chapitre.

Deuxième partie: Contributions

Avant propos

La sélection des sites potentiels de captage d'eaux souterraines est étroitement liée à la détermination de critères hétérogènes (géologiques, hydrologiques, topographiques, environnementaux, etc.) plus ou moins précis et de sources variées. La plupart des critères choisis pour cette étude sont déterminés à travers une bibliographie détaillée. Hormis l'étude de la piézométrie, débit et profondeur qui sont détaillées en chapitre 6, les autres études (vulnérabilité, recharge et qualité des eaux) sont brièvement présentées dans le chapitre 7 et détaillées en annexes afin de permettre aux lecteurs une meilleure fluidité en lecture.

Chapitre 6: Interpolation floue des données

Dans ce chapitre, nous proposons l'interpolation par krigeage flou de la piézométrie pour en déduire le rabattement, l'un des critères impliqués directement dans le processus SIG pour la sélection de sites potentiels de captage d'eau. Le krigeage flou est appliqué dans le processus de l'interpolation à travers l'emploi du variogramme flou. Cette méthode floue permet à l'utilisateur d'une part, de modéliser la subjectivité et l'incertitude qui entachent le choix des paramètres du variogramme flou, et d'autre part, de connaître l'incertitude de l'interpolation des données à chaque emplacement. Les critères débit et profondeur totale de l'aquifère sont présentés à la fin de ce chapitre.

Chapitre 7: Analyse SIG et carte des sites potentiels

Nous décrivons dans ce chapitre l'approche SIG qui a pour objectif l'établissement d'une carte de sites potentiels de forage de captage d'eau. Ce chapitre comprend les étapes suivantes:

1. Préparation des critères collectés et des critères étudiés.
2. Description et application de l'approche SIG adoptée dans cette recherche.
3. Etablissement de la carte de sites potentiels de captage d'eaux souterraines.

Chapitre 8: Méthode multicritère floue (MCFAD) et carte décisionnelle

Dans ce chapitre, nous proposons un processus de prise de décision. La méthode multicritère floue d'aide à la décision (MCFAD) employée, est appliquée à la zone d'étude. La modélisation des différents critères à caractère imprécis est possible par l'application de cette méthode. A la fin de ce chapitre une carte décisionnelle, pour la sélection du meilleur site potentiel de forage de captage d'eau, est établie. Une analyse de robustesse et la comparaison des résultats avec le modèle mathématique de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) sont également présentées à la fin de ce chapitre.

Troisième partie: Annexes

Annexe A: Etude de la recharge potentielle du plateau de Mostaganem

Cette annexe présente l'étude de la recharge potentielle de la nappe du plateau de Mostaganem. Cette étude propose une analyse spatiale pour l'évaluation et l'aboutissement à une carte synthèse de la recharge potentielle.

Annexe B: Etude de la vulnérabilité de la nappe du plateau de Mostaganem à la pollution par la méthode DRASTIC

Cette annexe décrit en détail l'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du plateau de Mostaganem. La méthode DRASTIC appliquée à la zone d'étude est détaillée.

Annexe C: Etude de la qualité des eaux souterraines du plateau de Mostaganem

Cette annexe décrit l'étude de la qualité des eaux souterraines de la nappe du plateau de Mostaganem. Cette étude est basée sur l'étude hydrochimique des eaux souterraines. Elle permet d'une part, de préciser la répartition des composants et de suivre leur évolution spatio-temporelle dans l'aquifère. D'autre part, de déterminer la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

Annexe D: Carte hydrogéologique interprétative de Mostaganem.

Annexe E : Analyses chimiques des eaux souterraines.

Annexe F : Cartes des contraintes liées à la proximité.

PREMIERE PARTIE

Notions générales

Chapitre 1

Principes fondamentaux des eaux souterraines

1.1 Introduction

L'accès facile à l'eau potable est un besoin humain fondamental dont dépendent la santé et la qualité de vie. Parce que les eaux souterraines sont invisibles, on y pense rarement, mais c'est l'une des meilleures sources d'eau que les humains peuvent utiliser (Soulsby D., 2012).

L'eau souterraine peut être extraite des sédiments ou des roches qui la renferment. L'eau stockée dans les formations géologiques fait partie intégrante d'un système hydrologique plus large, dont les constituantes dépendent les unes des autres. Ce concept est nécessaire à la compréhension de la répartition de l'eau souterraine, à son utilisation ainsi qu'à sa gestion et sa protection. C'est grâce à la nature des sédiments et à l'arrangement des formations géologiques que cette eau peut s'emmagasiner dans le sous-sol.

Toutefois, ces réserves sont susceptibles à des fortes pressions compromettant leur constance et leur qualité. L'utilisation des technologies informatiques nouvelles dans la recherche des eaux souterraines permet le développement et la gestion plus facile des données disparates liées à la ressource. Différentes nouvelles techniques telles que les Systèmes d'Information Géographique (SIG), l'analyse spatiale, le traitement d'image spatiale et les méthodes de modélisation tridimensionnelle sont constamment en développement afin d'identifier et d'explorer les eaux souterraines (Duchaine D., 1998; Sinan M., et al., 2003; Trabelsi N., et al., 2006; Sinan M., et Bouibrine N., 2007).

1.2 Qu'est-ce que les eaux souterraines ?

Les réserves disponibles en eau se composent des eaux souterraines, alimentés par les eaux de surface et les eaux des océans. « Eau souterraine » désigne l'eau sous le niveau du sol qui remplit les fissures dans le substratum rocheux ou les pores présents dans les milieux granulaires tels que le sable et le gravier (Myrand D., 2008). Les eaux souterraines ne sont pas canalisées comme les ruisseaux ou les rivières, mais circulent au plus profond des formations géologiques qui composent l'espace souterrain. Les eaux souterraines sont une partie importante du cycle hydrologique (figure 1.1). Dans une quantité de pluie donnée, une partie retourne dans l'atmosphère (évaporation), les plantes en absorbent une partie du sol et la renvoient dans l'air (transpiration), une partie est perdue dans les rivières ou les lacs et le reste s'infiltré dans le sol (osmose), circule en vertical vers la zone de saturation (nappe phréatique) et se déplace vers l'aval vers les zones de résurgence naturelle (canaux d'eau).

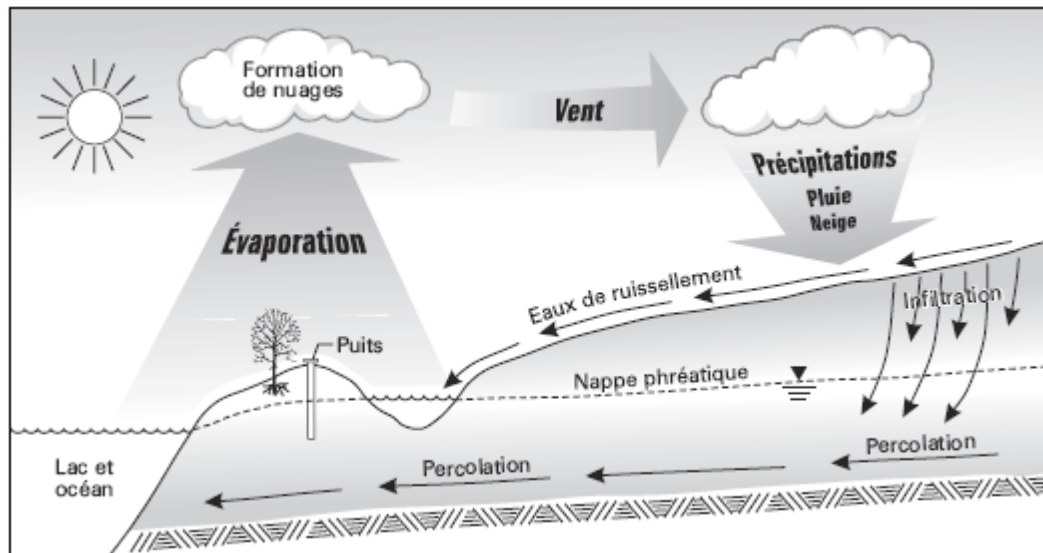


Figure 1. 1 . Cycle hydrologique (Myrand D., 2008).

1.3 Hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science qui étudie les eaux souterraines. Son objectif est d'étudier le rôle des structures matérielles et géologiques qui composent le sol et le sous-sol à l'origine, la distribution et le schéma des sédiments, ainsi que les schémas d'écoulement et les propriétés physico-chimiques de l'eau. Bref, c'est de la « géologie appliquée à l'eau », qui est une définition parfois restrictive de l'hydrogéologie.

L'hydrogéologie traite également du développement et de la protection des ressources en eaux souterraines. L'hydrologie est définie comme la science des eaux de la Terre. L'hydrogéologie retient le domaine qui comprend les sols et les sous-sols et l'interaction de la géologie avec les eaux de surface.

Le sol et le sous-sol sont composés de substances qui peuvent stocker, laisser s'écouler et restituer les eaux souterraines à des degrés divers en fonction de leurs propriétés physiques et hydrologiques.

Ces substances produisent les formations lithologiques, éléments architecturaux des structures géologiques. Les sels solubles contribuent à la composition chimique de l'eau (ex : eau minérale ordinaire, eau sulfatée de sodium des roches métamorphiques, sulfate de calcium des formations de gypse).

1.4 Aquifère et nappe d'eau souterraine

Les sous-sols sont de nature très variée : caillouteux, rocheux, sablonneux, argileux. La variété des interstices est la même, des minuscules pores aux plus grandes grottes, en passant par les

crevasses et fentes. Les formations rocheuses à travers lesquelles les eaux souterraines peuvent s'écouler sont appelées « aquifères ».

La nappe phréatique est l'eau contenue dans les crevasses ou fissures de l'aquifère. Seule l'eau libre, c'est-à-dire capable de circuler dans la roche, fait partie de la nappe phréatique. Ce type de réservoir est opérationnel et peut alimenter les réseaux de distribution d'eau potable.

Le lien de la nappe avec l'aquifère est analogue à celui du contenu et son contenant.

1.4.1 Types d'aquifères

Selon la géologie du terrain, on peut distinguer différents types d'aquifères (OFEFP, 2003):

- Aquifère de roches meubles

L'aquifère est composé de: sable, craie, gravier, grès, scories volcaniques, etc. La nappe phréatique est stockée entre les caillasses et les grains de sable d'une roche meuble comme celle illustrée dans la figure 1.2. Il existe une multitude de pores qui lui confèrent son caractère « spongieux ». Ces interstices représentent jusqu'à un cinquième du volume occupé par un tel cailloutis et peuvent absorber donc des quantités d'eau importantes.



Figure 1. 2. Aquifère poreux.

- Aquifère fissuré

Dans les aquifères **fracturés** ou à porosité de fissure, l'écoulement des eaux souterraines se produit de façon préférentiel et culminante le long des fractures, des diaclases et des failles. Ces aquifères sont formés de roches cristallines d'origines plutonique (ex. granite,...) ou métamorphique (ex: schiste, gneiss, micaschiste, etc).



Figure 1. 3. Aquifère fissuré.

- Aquifère karstique

Les aquifères karstiques se développent dans des formations rocheuses solubles, principalement des carbonates (calcaire, craie, dolomie). La solubilité de la roche durant la circulation des eaux souterraines exacerbe les hétérogénéités du milieu avec, d'une part, des fissures (élargies par la, dissolution) très perméables et, d'autre part des cavités et des micro-fractures peu perméables.



Figure 1. 4. Aquifère karstique.

1.4.2 Types de nappes d'eau souterraine

Il existe plusieurs types de nappes selon les roches-magasins et selon la nature du réservoir (Wanko A., 2016):

- Nappe libre

C'est une nappe phréatique dont la surface supérieure est à la pression atmosphérique : c'est la surface piézométrique. Le niveau d'eau dans le forage représente la surface piézométrique. Ces aquifères sont généralement très peu profonds (1 à 20 mètres).

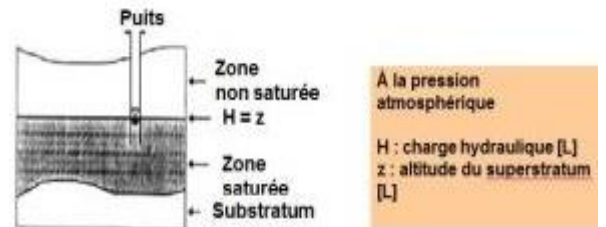


Figure 1. 5. Nappe libre.

- Nappe captive

C'est une nappe confinée dont la surface supérieure est en contact avec un matériau imperméable qui confine l'eau. Le niveau d'eau dans le forage représente toujours le niveau piézométrique, qui dans ce cas est supérieur à la limite supérieure de l'aquifère.

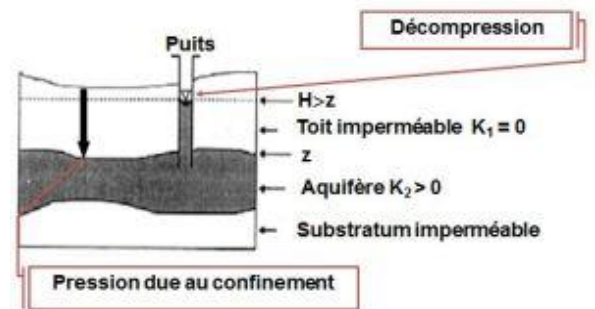


Figure 1. 6. Nappe captive.

- Nappe semi-captive

Une nappe semi-confinée est une nappe souterraine dont la surface supérieure est en contact avec un matériau semi-imperméable, enfermant ainsi partiellement de l'eau.

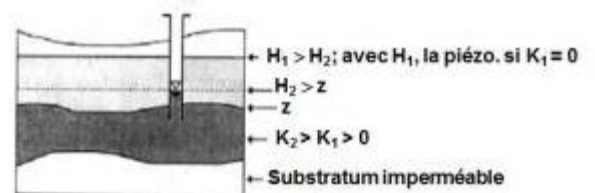


Figure 1. 7. Nappe semi-captive

- Nappe double (captive & libre)

Les nappes doubles mettent en évidence le phénomène de drainance, qui permet à l'aquifère du dessous d'alimenter en eau l'aquifère du dessus.

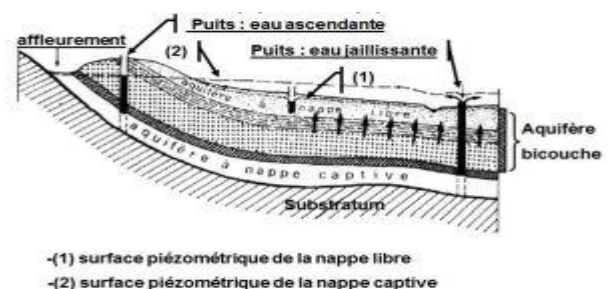


Figure 1. 8. Nappe double (captive&libre).

1.5 Exploitation des eaux souterraines

La quantité d'eau prélevée d'un aquifère est liée aux dimensions et à la géométrie du réservoir, aux caractéristiques hydrogéologiques et aux possibilités productives des ouvrages de captage. Les ouvrages de captage peuvent être divisés en trois grands types : les ouvrages horizontaux (tranché, drain, corridors), les ouvrages verticaux (puits et forage) et les ouvrages mixtes (puits à drains rayonnants, galeries drainantes).

Les types d'ouvrages sont adaptés aux caractéristiques des aquifères et des ouvrages hydrogéologiques. Les structures horizontales sont utilisées dans les aquifères peu profonds (quelques mètres), minces et peu perméables. Les puits et les forages conviennent aux aquifères de différentes profondeurs et ont une bonne perméabilité. Les structures mixtes captent des aquifères hétérogènes avec des couches privilégiées de haute perméabilité.

Les puits et les forages sont très divers en termes de profondeur, de volume d'eau, de coût et de pureté de l'eau.

Les puits creusés à la main comptent parmi les plus anciennes sources d'approvisionnement en eau. Un puits creusé à la main avec la participation de la population est généralement nettement moins cher. L'ouverture des puits creusés à la pioche est beaucoup plus grande (l'ouverture grande permet la descente des puisatiers) que celle des puits creusés en enfonçant des outils dans le sol, ou des forages dont l'ouverture est étroite selon les outils utilisés et la grande profondeur à atteindre.

De nombreux puits modernes sont des forages creusés par l'enfoncement d'un outil dans le sol ou par l'action rotative d'un outil coupant (tarière, foreuse, trépan), qui tourne autour d'un axe vertical, brisant et mordant la roche dont les débris sont généralement transportés à la surface par la boue. Ils peuvent atteindre des profondeurs allant jusqu'à 300 m.

1.6 Secteur de l'eau en Algérie

Depuis le début des années 2000, le gouvernement algérien a pris des mesures importantes pour surmonter la pénurie d'eau qui affecte le pays. Les questions de l'eau ont été placées en tête de l'agenda politique et des mesures importantes ont été prises pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles (Mozas M., & Ghosn A., 2013).

Le potentiel hydrique naturel de l'Algérie est estimé à 18 milliards de mètres cubes par an (Mozas M., & Ghosn A., 2013) :

- Dans la région Nord 12,5 milliards de m³/an, dont 10 milliards en écoulement de surface et 2,5 milliards en ressources souterraines (ressources renouvelables).

- Dans les régions sahariennes 5,5 milliards de m³/an, dont 0,5 milliard en écoulement de surface et 5 milliards en ressources souterraines.

L'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62% du total du pays). La demande en eau potable, en forte augmentation depuis les années 1970, représente 35% de la demande totale. La part du secteur industriel dans la demande en eau n'est que de 3% (Mozas M. et Ghosn A., 2013).

Le captage des eaux souterraines par forage est l'une des solutions proposées pour répondre aux besoins en eau de la population pour l'approvisionnement en eau potable ou l'irrigation. Les eaux souterraines représentent aujourd'hui environ 52% de l'eau utilisée en Algérie (Faysse et al., 2011). La diminution des coûts de forage a été la principale raison de cette croissance. Il est à noter que les agriculteurs en Algérie ont mentionné que la forte baisse des coûts de forage a été rendue possible par l'arrivée de foreurs d'origine syrienne. D'autres facteurs tels que la sécheresse ont également contribué à cette croissance rapide de l'irrigation des eaux souterraines (Faysse et al., 2011).

1.7 Aquifères de l'Algérie

Les différentes études et prospections faites dans le nord de l'Algérie (prospection géophysique, études hydrogéologiques, études cartographiques, forages de reconnaissance, modélisation) ont permis de répertorier (Demmak, 2012):

- 177 aquifères.
- 9 000 sources.
- 23 000 forages.
- 60 000 puits.

Les deux (02) principaux types d'aquifères qui caractérisent le nord Algérien sont (figure 1.9):

- Les aquifères karstiques : formations calcaires étendues.
- Les aquifères alluviaux: grandes plaines d'effondrement, comblées par un remplissage alluvial.

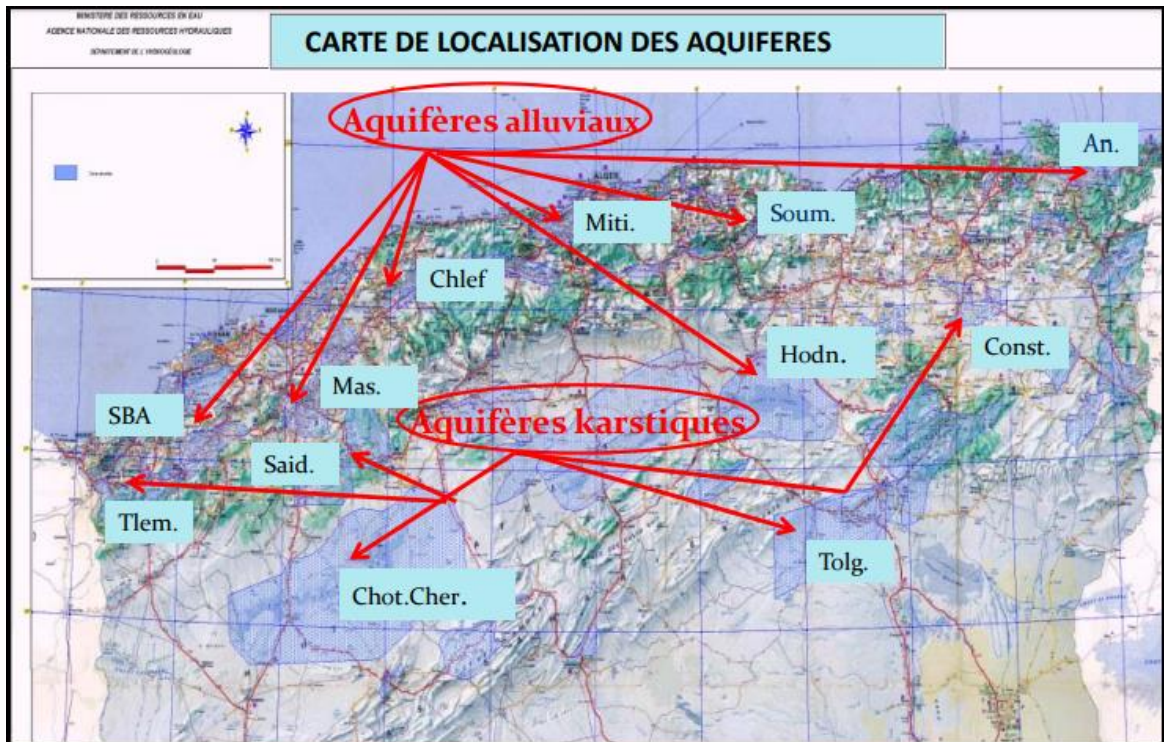


Figure 1. 9. Aquifères de l'Algérie (Demmak, 2012).

Au sud de l'Algérie les deux zones aquifères du Sahara septentrional (voir figure 1.10) sont:

- Le Complexe Terminal (CT): avec des potentialités exploitables 5 à 6 milliards de m³.
- Le Continental Intercalaire (CI): avec des ressources exploitées de 2 milliards de m³/an.

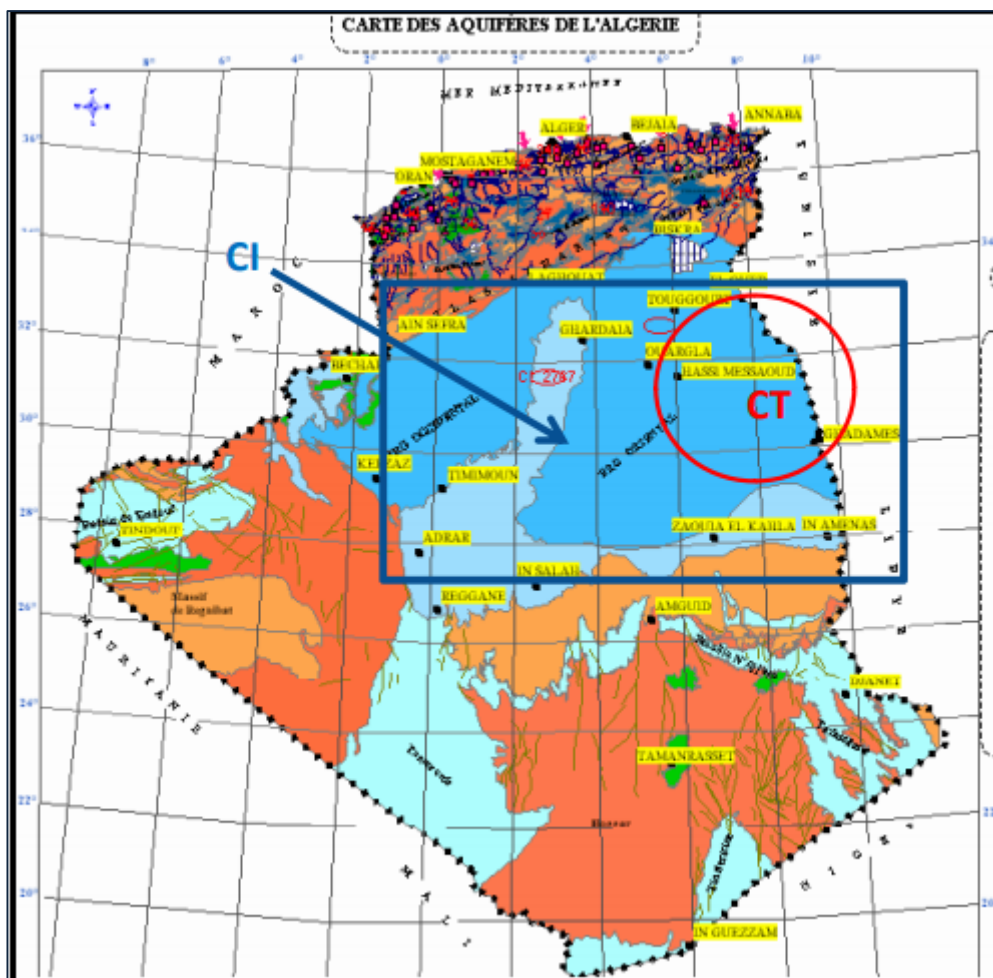


Figure 1. 10 : Les eaux souterraines du Sahara septentrional (Demmak, 2012).

1.8 Conclusion

Les eaux souterraines sont des réserves d'eau situées sous la surface terrestre, dans des formations géologiques appelées aquifères. La recharge des eaux souterraines se produit lorsque de l'eau provenant des précipitations s'infiltré dans le sol et atteint la zone saturée. Les eaux souterraines contribuent à l'alimentation des rivières, des lacs et des océans.

En Algérie, la gestion des eaux souterraines est une préoccupation majeure en raison de la dépendance du pays à l'égard de ces ressources pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et d'autres usages.

Chapitre 2

Contexte géologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude

2.1 Introduction

L'application de la méthodologie développée dans le cadre de cette thèse est faite sur le plateau de Mostaganem qui appartient au Tell occidental algérien, à une soixantaine de kms à l'est d'Oran, plus exactement dans la wilaya de Mostaganem. Le choix de cette zone d'étude est justifié par la disponibilité des données, notamment, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère du plateau.

2.2 Aperçu géographique de la zone d'étude

La wilaya de Mostaganem (figure 2.1.b), deuxième port de l'Oranie, se trouve au nord-ouest de l'Algérie (figure 2.1.c) et au sud de l'embouchure du Chellif qui est un fleuve des plus importants d'Algérie. La ville est construite sur un bombement côtier qui sépare une étroite zone littorale d'un plateau grésosableux appelé plateau de Mostaganem (figure 2.1.a).

2.2.1 Localisation géographique du plateau de Mostaganem

Le plateau de Mostaganem est bien caractérisé. Il a comme limites:

- A l'est, les Djebels d'Ennaro et de Bel Hacel et le synclinal de Bouguirat.
- A l'ouest, un bourrelet côtier qui l'isole du littoral.
- Au nord, le bassin du Chellif.
- Au sud, la plaine des Bordjias marquée par un changement brutal de l'altitude qui passe de 180 à 50m. La ligne de flexure est légèrement au nord des villes Ain Sidi Cherif, Mesra et Blad Touaria.

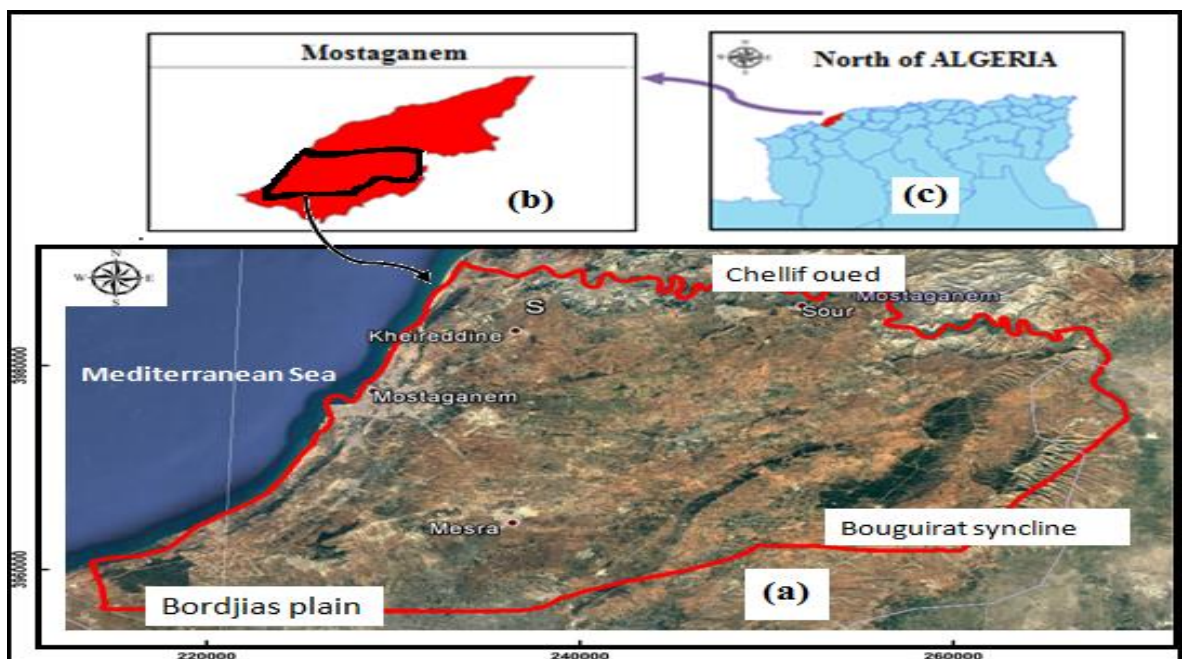


Figure 2. 1. Localisation géographique du plateau de Mostaganem

2.2.2 Morphologie

Le plateau couvre une superficie de 700 km², son altitude est comprise entre 110 m (à l'Ouest) et 470 m (à l'Est). Il est caractérisé par une altitude moyenne de 200 m. Le plateau est en fait affecté par de nombreuses ondulations orientées NE-SW. A l'Est, on note même de véritables collines toujours orientées NE-SW (Akboude, Ennaro, djebel Djezzar, Koubia Bsibissa).

Les vents d'ouest dominants favorisent la formation de dunes de sables sur les flancs ouest des djebels.

Sur le plan morphologique, ce plateau est composé de deux secteurs :

2.2.2.1 Frange littorale

Les dunes littorales et les formations grésifères du quaternaire dessinent un arc dont nous pouvons penser qu'il est la résultante de l'action des vents dominants et de la houle sur les structures régionales.

2.2.2.2 Plateau proprement dit

Sur la partie occidentale, des faibles ondulations séparées par des vallées en forme de fuseaux sont distinguées :

- Vallée des Jardins au Centre.
- Dépression de Tounin Sayada au Nord.
- Vallée de Hassi Mamèche (Rivoli) au Sud.

Vers Tounin et Blad Touahria ; les sables prennent de plus en plus d'importance donnant deux grandes crêtes alternantes avec des dépressions parfois marécageuses (Belhadri, Merzouka, d'Ennaro). Au-delà de la crête de sidi Abdellah, nous entrons dans les montagnes boisées, des forêts d'Ennaro, de l'Akboube et de Belhacel. Les reliefs s'accroissent vers l'Est (vallée de la soif).

2.2.3 Hydrographie

L'hydrographie du plateau de Mostaganem est très modeste. Elle est limitée à deux petits oueds permanents et à un réseau de drainage (figure 2.2).

- Oued Séfra : qui prend naissance dans la région des "sept puits" dont la longueur est de 11km. Malheureusement, il sert de collecteur d'égouts de la ville de Mostaganem.
- Oued El Kheir : affluent de Chellif, d'une longueur de 6km, il est alimenté par les sources d'Ain Soltane et Ain Hallouf.

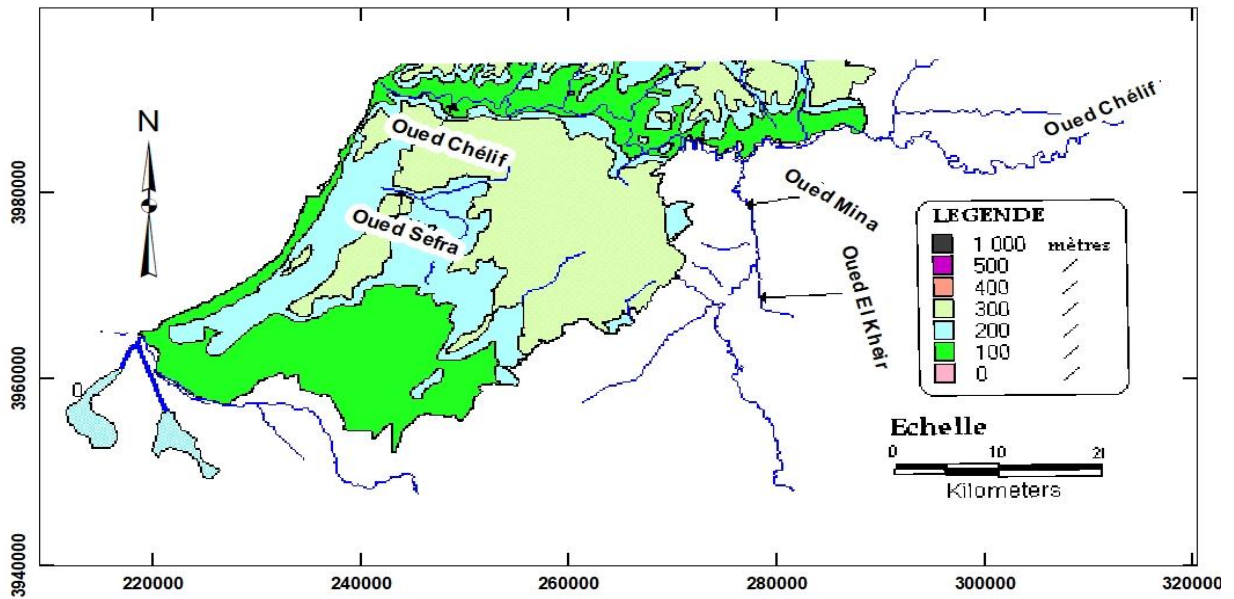


Figure 2. 2. Hydrographie du plateau de Mostaganem.

Sur le plateau de Mostaganem seules des dépressions, comprises entre 150 et 200 m et orientées Ouest-Est, constituent des zones d'accumulation des eaux. Ces dépressions sont les suivantes : La vallée des jardins et du Nadour, la dépression de Bel-Hadri-Marzuka, les marais d'Ennaro, la cuvette de Torch, la dépression de Tounin-Sayada (au Nord-Ouest) et enfin à l'Est, la vallée de la Soif.

Deux de ces dépressions semblent présenter un drainage naturel exoréique : la vallée de l'oued Aïn Sefra qui traverse la ville de Mostaganem et la vallée de l'oued Tinne au niveau de la cuvette de Torch.

Les oueds existants se situent principalement en bordure du plateau:

- Oued Chellif au Nord, qui est l'un des plus grands fleuves algériens ;
- Oued Mina à l'Est.

Ces deux oueds ne jouent aucun rôle dans l'alimentation de la nappe du Calabrien. Ils sont en effet isolés du plateau par des marnes.

2.3 Climatologie

Le plateau se caractérise par un régime climatique de type méditerranéen, doux et humide en hiver, sec et chaud en été. La pluviométrie annuelle est fortement irrégulière.

L'indice de Martonne $I=11.2$ témoigne d'un climat semi-aride. L'indice sur le niveau de l'évaporation est tangible. En cela, l'évaporation est bien sûr très importante en été (169.4 mm en juillet) qu'en hiver (59.6 mm en février) (Baroudi, 2010).

Le tableau suivant donne un aperçu global sur le climat de la wilaya de Mostaganem.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Octo	Nov	Déc
Température moyenne (°C)	10.9	11.4	13.6	16.1	19.4	23.5	26.3	26.9	24	20.6	15.1	12.1
Température minimale moyenne (°C)	7.2	7.5	9.5	11.8	15	18.7	21.5	22.3	20	16.6	11.6	8.6
Température maximale (°C)	15	15.7	18.3	20.8	24.1	28.6	31.7	32.2	28.8	25.3	19	16.1
Précipitations (mm)	56	45	44	38	24	4	1	3	15	34	74	49
Humidité (%)	78%	75%	74%	70%	68%	63%	62%	64%	67%	71%	74%	77%
Heures de soleil (h)	7.3	8.1	9.0	10.1	11.1	11.9	11.9	11.1	10.1	9.0	7.6	7.1

Tableau 2. 1: Tableau climatique de MOSTAGANEM (climate-data.org)

Données: 1991 - 2021 Température minimale moyenne (°C), Température maximale (°C), Précipitations (mm), Humidité. Données: 1999 - 2019: Heures de soleil/jours.

Une différence de pluviométrie de 73 mm est enregistrée entre le mois le plus sec et le mois le plus humide de l'année. Une variation de 16 °C est constatée sur l'ensemble de l'année (climate-data.org).

2.4 Géologie

Deux types de formations affleurent sur la carte géologique du plateau (figure 2.3) :

- Des formations de type allochtone.
- Des formations autochtones Miocènes et post Miocènes qui constitue la majeure partie.

2.4.1 Formations type allochtone

Ce sont des terrains les plus anciens, du plateau de Mostaganem. Elles présentent deux types d'allochtones :

- Le diapyrisme.
- Les nappes de charriages.

2.4.1.1 Diapyrisme

Il se manifeste à l'Est d'Ain Nouissy où affleure un diapir de gypse renfermant des roches volcaniques (ophites), des marnes vertes ou rose, avec la présence de quelques bancs de calcaires attribués au Crétacé inférieur. La source de ces diapirs est le Trias évaporitique. Il a été étudié en 1903 par Gentil L. et en 1919 par Dalloni M.

C'est un anticlinal étiré et déversé (Gentil L., 1903). Il déforme le Pliocène et coupe à l'emporte pièce les séries néogènes avec les blocs de granite, de diorite et de micaschiste. Ce même diapir relève parfois les séries Miocènes à la verticale (Montagne ronde).

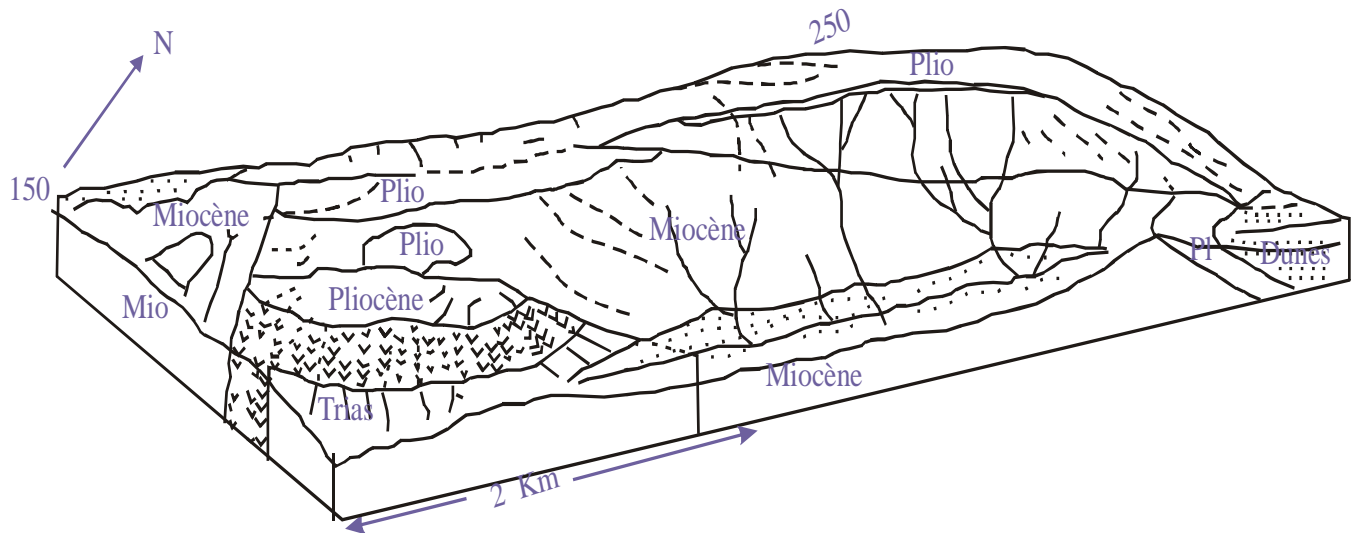


Figure 2. 4. Bloc diagramme de la région de Ain Nouissy (Gentil L., 1903).

2.4.1.2 Nappes de charriages

Au Nord de Mostaganem (Kharouba et Djebel Diss), apparaît un ensemble de terrains appartenant aux nappes qui se prolongent dans la vallée du Chellif jusqu'à l'oued Mina. D'après D.E.M.R.H, (1978), ces nappes sont constituées de bas en haut par:

Flysch Albien violet :

Il renferme des pélites bleu clair avec de petits bancs calcaire-ferrugineux (épaisseur de 10 cm). Au sommet, on peut trouver des niveaux de phtanites et des débris de marno-calcaires.

Flysch du Crétacé inférieur de couleur verte :

Il est constitué de calcaire ferrugineux, avec des pélites d'une couleur vert sombre. Les grès sont plus abondants, ils sont quartziques à patine rouille et à cassure en éclat de couleur gris-vert très clair.

Gypse de trias :

Il renferme des ophites, de la dolomie noire fétide et des marnes vertes et roses.

- Au fond d'une chaâbet entre Djebel Aizeub et oued Ben Kramel (x = 269.96km et y = 305.25km).
- En rive droite du Chellif à la Makeba Sidi Abdellah (x=270,55km et y=306,70km)
- En rive gauche du Chellif, à 1 km, en aval de Belatar.

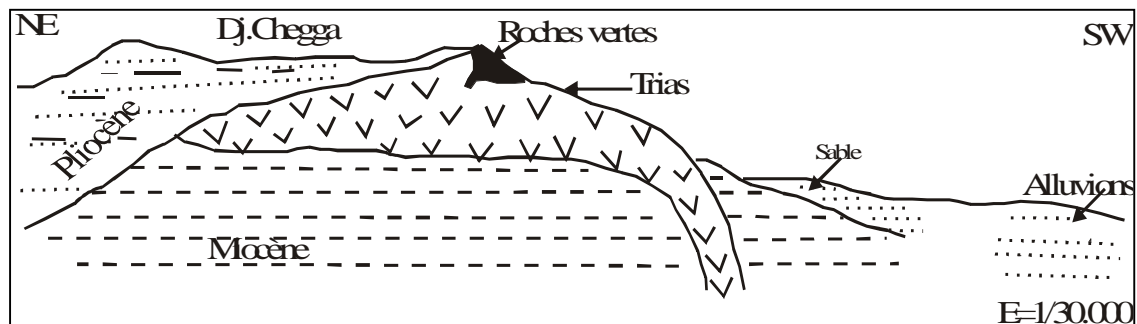


Figure 2. 5. Coupe du Trias d'Ain Nouissy (Gentil L., 1903).

Les terrains antimiocènes de cette région sont allochtones et constituent des nappes de glissement (Delteil, 1974). L'unité marno-calcaire accompagnée de Trias gypseux repose indifféremment sur les flyschs vert et violacé qui sont en position stratigraphique inverse, formant eux aussi deux nouvelles unités entièrement allochtones (DEMRH, 1978).

2.4.2 Formations autochtones

Elle comporte trois types de formations. (D'après Perrodon A., 1957):

- Le miocène.
- Le pliocène.
- Le quaternaire.

2.4.2.1 Miocène

Diviser en trois types:

Miocène inférieur: On y trouve des marnes rouges (riche en galet), des grès ou des conglomérats, tous ces niveaux rouges correspondent à des formations continentales qui passent à des marnes brunes renfermant des gravelles, du gypse fibreux ou lamellaire. L'étude de la microforme de ces marnes relève des remaniements d'éléments crétacés par la mer.

Miocène moyen : Il est représenté par une série marno-gréseuse de couleur bleue qui s'altère en faune, surmonté par des marnes bleues à gypse en fer de lance.

Miocène supérieur : On y trouve des marnes bleues, qui en altération présentent une couleur brune jaunâtre .Ces marnes comportent des cristaux de gypse en fer de lance et des filons de gypse fibreux ou saccharoïde, ainsi que quelques niveaux de grès argileux.

Cet ensemble est recouvert par des alternances des tripolis (diatomites, de marne bleues et de cinérites). Cette formation a une épaisseur très variable de quelques centimètres à vingt mètre, dans la région Nord-Est, elle atteint une cinquantaine de mètres.

Elle est rencontrée en quatre endroits :

- La rive gauche du Chellif (x = 267,30km et y = 300,40 km)
- Du nord de Ain Tedeles (x = 285,00 km et y = 304,00 km)
- Au confluent Oued El-Kheir, Ain Soltane (x = 292,90 km et y = 300,70 km)
- A Stidia (x = 256,80 km et y = 285,00 km).

Surmontant localement le niveau précédent. Quelques bancs de gypse d'une épaisseur également très variable (de 0 à 100 mètres), se retrouvent à l'ouest d'Ain Boudinar, à l'ouest d'Ain Tedles et à Douar Amarna.

Ce niveau est constitué soit en saccharoïde soit en fer de lance. Cette formation de gypse correspond à l'ancien bras de mer qui est formé et transformé en lagunes où l'évaporation était

très intense. Cette formation est attribuée au miocène supérieur qui constitue la limite approximative Miocène supérieur -Pliocène inférieur.

2.4.2.2 Pliocène

On distingue deux séries marines et continentales.

Le pliocène marin : constitué de :

- **Plaisancien** : il se représente par une série de marnes bleues à coccolites. Elles sont comparables à celles du Miocène, mais souvent plus claires ou même blanchâtre et également plus fossilifères. On y trouve des macro fossiles telle que : lamellibranche (ostracod, *Cardium deutalium*) surtout à Ouréah, Ain Tedeles et Ain Soltane. En plus, ces marnes renferment des formations qui renferment localement quelques filons de gypse saccharoïde (Ouréah). Elles présentent aussi quelques niveaux sableux fossilifères.
- **Astien** : Le passage du Plaisancien à l'Astien est matérialisé par les marnes bleues qui changent progressivement à des marnes sableuses et à des sables argileux. Les grès astiens sont représentés par une série marine sableuse de couleur jaune renfermant des grès peu argileux à ciment calcaire de puissance de 100 m, les grès affleurent sur les flancs des djebels Mina et Mouzaia.

Le Pliocène continentale : repose sur les grès marins de l'Astien. On trouve des dépôts fluviaux et lacustres renfermant des lentilles irrégulières de sables grossiers et graviers avec des passées conglomératiques à différents niveaux. D'après Perrodon A., 1957, il est formé par des sables roux et grès à Hélix, souvent d'origine dunaire affleurent dans la partie nord du plateau.

2.4.2.3 Quaternaire

La période d'émersion du Pliocène continental est suivie par un épisode marin au Calabrien, ce dernier est formé par des grès calcaires plus ou moins perméables discordants sur toutes les formations précédentes qui sont peu ou pas perméables. Il débute par un niveau de micro poudingues, à éléments calcaire-gréseux qui se poursuit par des grès jaunâtres grossiers vacuolaires et se terminent par des lumachelles qui sont présents sur toute la superficie du plateau, il renferme quelques fossiles par exemple lamellibranches.

Le reste du Quaternaire est constitué de grès jaunes dunaires à stratifications entrecroisées et des limons où dominent les sables résultants de la désagrégation des formations marines du Calabrien, la puissance de cet ensemble est sur le plateau de Mostaganem de l'ordre de 20 à 30m (Gauchez, 1981). Cette formation est surmontée par une croûte calcaire-gréseuse de couleur blanchâtre avec quelques passées beiges noduleuses d'aspect parfois crayeux ou rubané, elle repose indifféremment sur les grès du pliocène supérieur, les marnes ou les dunes (0,02 à 1,20m). Cette croûte paraît résulter de la cimentation des sables par les sels minéraux et en

particulier le carbonate de calcium déposé par les eaux au moment de leur évaporation. Elle protège les dunes contre l'érosion.

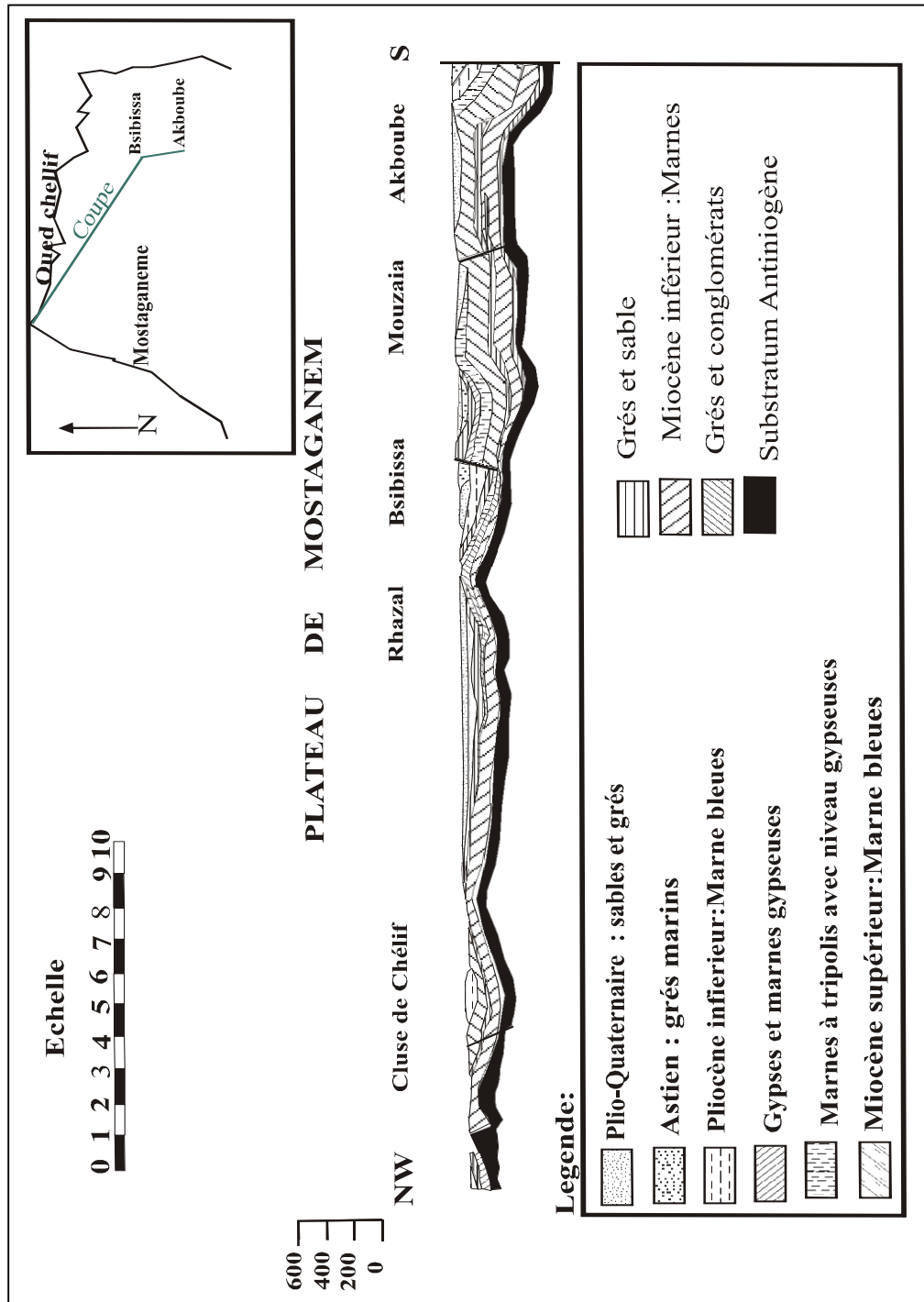


Figure 2. 6. Coupe géologique du plateau de Mostaganem.
D'après la S.N. REPAL (1951)

2.5 Litho-stratigraphie

Le plateau de Mostaganem comporte dans son ensemble, une série imperméable constituée de marnes du Miocène ou du Pliocène inférieur qui forment le mur de l'aquifère. Ces marnes sont

surmontées par des formations gréseuses ou grés-sableuses avec quelques passées argileuses du pliocène supérieur et de quaternaire (figure 2.7).

On distingue un ensemble de formations liées à deux grands cycles sédimentaire: Miocène et Pliocène (Perrodon A., 1957). Ces deux cycles viennent s'installer sur un substratum formé essentiellement de grès et d'argiles du Numidien, de flysch vert du crétacé inférieur et de marne, marno-calcaires et de gypse du Trias. Le Quaternaire, constitué de terrains plus ou moins perméables, repose en discordance sur les formations précédentes (Gauchez, 1981). Il est constitué de micro-poudingues et de grès grossiers, attribués au Calabrien. Ce dernier est recouvert par des dépôts de grès à Hélix, de dunes consolidées, et de sols rouges.

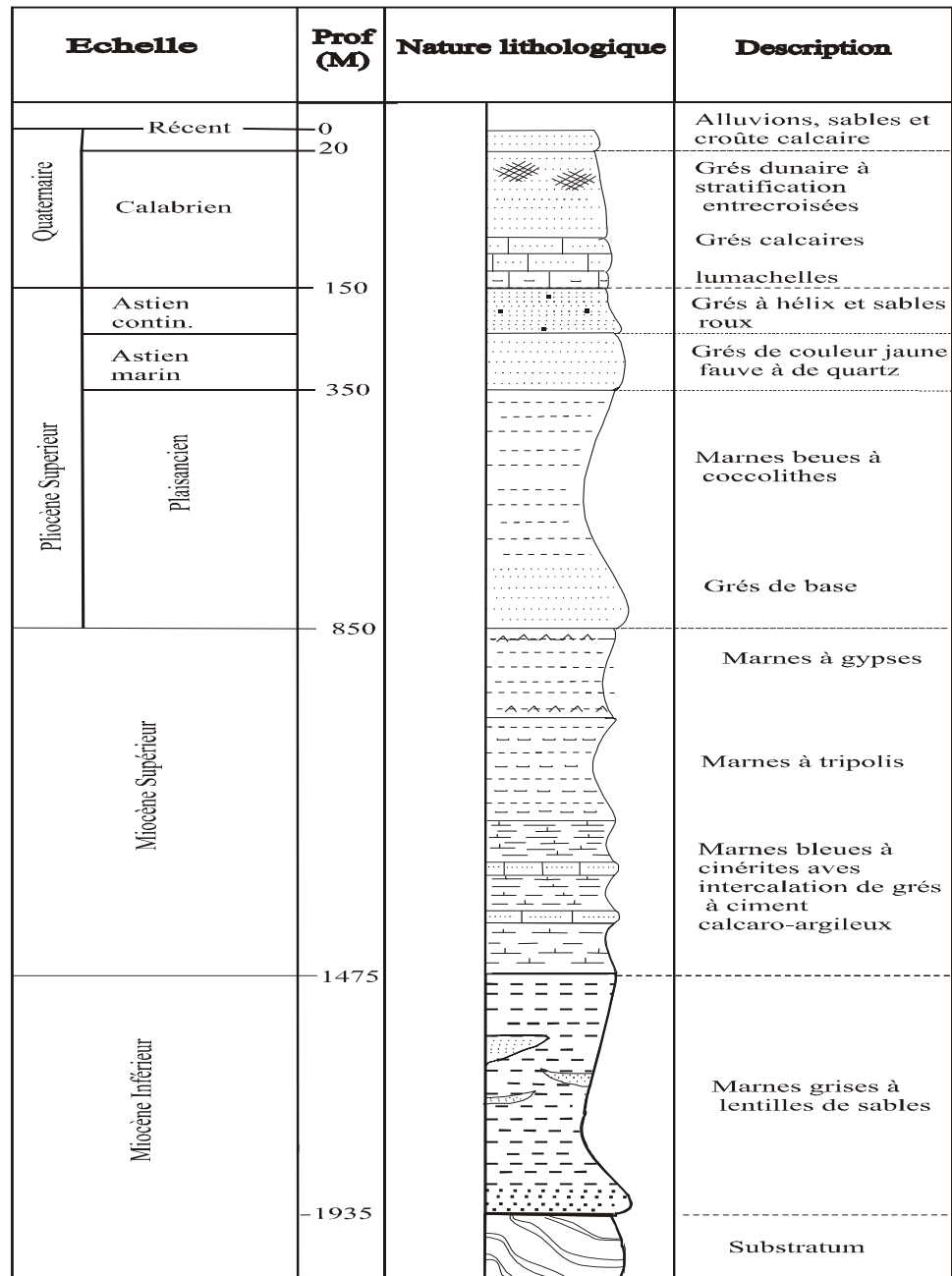


Figure 2. 7. Log litho-stratigraphique synthétique (source: ANRH, 2006). Echelle:1/10.000

2.6 Etude structurale

Dans sa partie centrale, le plateau de Mostaganem a été atteint par une série de transgressions marines dont celle du Pliocène et du Quaternaire ancien et qui ont laissé des dépôts gréseux et sableux, ensuite des déformations en compression d'âge Quaternaire (Thomas, 1985) qui ont donné une série de plis NE-SW affectés par les failles E/W suivantes:

- Le petit synclinal de Mazagran.
- L'anticlinal de Sidi Ben Haoua.
- Le synclinal de Hassi-Mameche et celui de la vallée des jardins qui déterminent une morphologie actuelle (séries des dépressions).

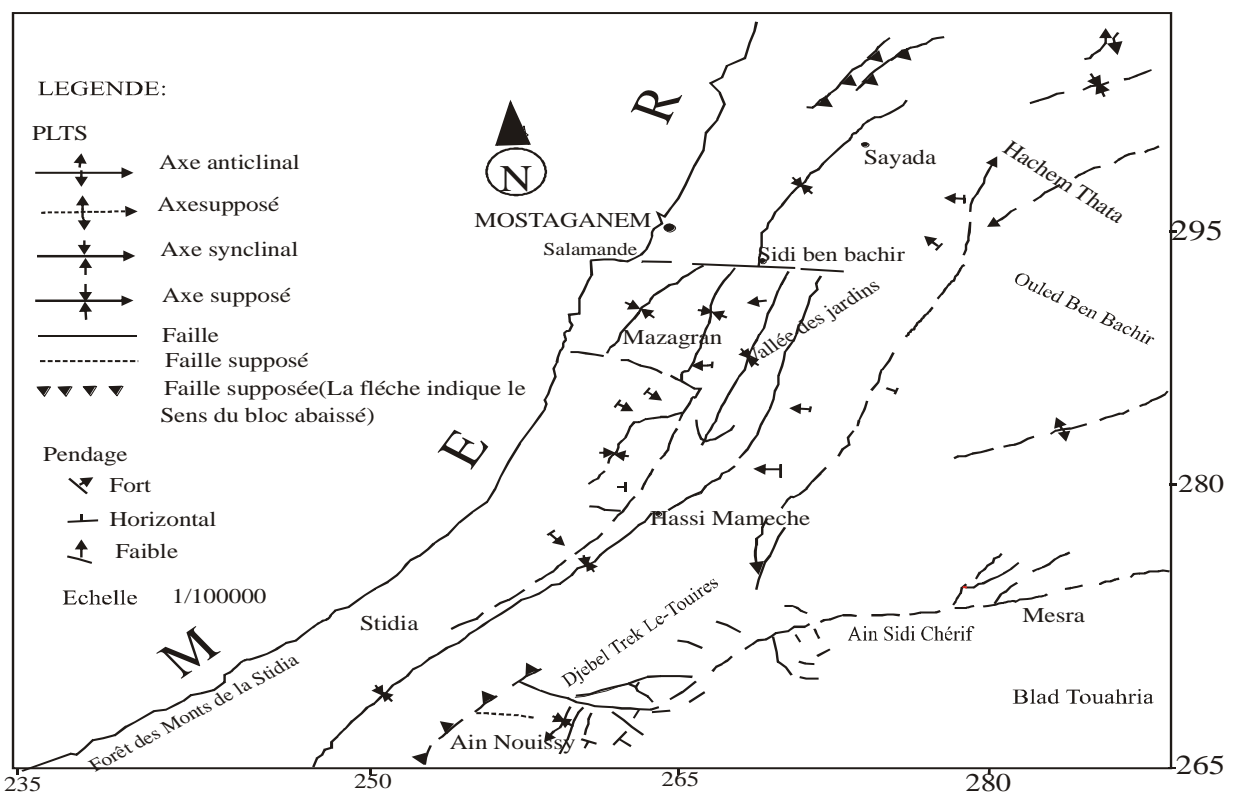


Figure 2. 8. Carte structurale du plateau de Mostaganem (Baiche, 1993)

2.6.1 Bordures du Plateau

Le plateau de Mostaganem est limité par quatre types de bordures, à savoir:

- La bordure méridionale
- La bordure orientale (Bel Hacer)
- La bordure septentrionale
- La bordure occidentale

2.6.1.1 Bordure méridionale

Sur cette bordure existe deux types de déformations, souples et cassantes.

- Les déformations souples : pour ces déformations, le trait le plus marquant apparaît au niveau du Djebel Treck El Touires, vaste bombement anticlinal dissymétrique faisant affleurer les marnes bleues du Miocène supérieur surmontées par les déformations du Pliocène.
- Les déformations cassantes : Cet anticlinal est limité à sa partie Ouest par une faille (N30°E). Il est affecté par une multitude de petites failles de différentes directions, mais la direction privilégiée (SW-NE) est toujours conservée.

2.6.1.2 Bordure orientale (Bel Hacel)

Sur cette bordure, existe d'importantes déformations souples accompagnées d'accidents. Ces structures sont orientées en moyenne SW-NE et qui séparent le plateau de Mostaganem et la plaine de Rélizane.

Trois axes anticlinaux sont à remarquer:

- Un premier axe anticlinal jalonné par le Djebel Milar, par Djebel Mouzaia et celui de la forêt d'Ennaro, et Djebel Djazzar.
- Un deuxième axe anticlinal est situé dans le prolongement de Bouguirate et il est constitué par l'anticlinal de l'Akboube.
- Un troisième axe anticlinal est déterminé par le Djebel Bel Hacel.

Toutes ces structures sont dissymétriques avec un des pendages du flanc plus marqué que l'autre, ces plis touchent le Pliocène et en particulier le Pliocène supérieur.

2.6.1.3 Bordure septentrionale

Elle apparaît au niveau de la cluse de Chellif. Au sud de ce secteur le massif du Dahra s'enneie sous les formations du Miocène supérieur du plateau de Mostaganem, le Djebel Diss constitué un éperon où réapparaissent par du Miocène continental.

2.6.1.4 Bordure occidentale

Cette bordure est constituée par des falaises qui se développent depuis l'embouchure de la Macta jusqu'au Djebel Diss. Cette ligne de falaise montre une double structuration : la direction SW-NE correspond au flanc oriental des synclinaux en échelon de Hassi Mameche, la vallée des jardins, et la direction E-W mise en évidence par l'âge de substratum du Pliocène Supérieur.

2.6.2 Failles

Ce sont des failles de décrochements dextres orientées sensiblement E-W qui appartiennent à la série des accidents qui affectent l'ensemble de l'Oranais. Les accidents les plus importants se situent au Sud et Nord du plateau. Mais, (L. Glangeud, 1932) a mis en évidence deux structures (N10°E et N50°W) qu'il appela les « transversales ». La structure N10°E est la plus caractéristique, tandis que celle du N50°W semble être d'origine plus ancienne (Delteil, 1974).

2.7 Hydrogéologie

2.7.1 Le réservoir

Il est formé essentiellement par le Calabrien. Les terrains imperméables du Miocène et du Pliocène inférieur constituent le mur de la nappe. La topographie actuelle reflète bien l'allure du toit du substratum. L'épaisseur du Calabrien est maximum dans les dépressions où elle atteint 100 à 120 m, tandis que sur les reliefs qui correspondent à des bombements du Mio-Pliocène elle est de 20 à 30 mètres seulement. Le tableau 2.2 donne un récapitulatif sur les formations aquifères au niveau du plateau de Mostaganem (D.E.M.R.H, 1978).

2.7.2 Alimentation et exutoires

L'alimentation de la nappe libre du plateau de Mostaganem se fait par :

- Des infiltrations directes dans les zones d'affleurement ;
- Percolation aux travers des terrains sus-jacents ;
- Communication (réduite vue la lithologie des terrains) avec les grès, sables argileux et micro poudingue sous-jacents.

Le substratum de l'aquifère est principalement constitué les marnes bleues du Pliocène inférieur. Cependant, dans le cas où une lacune existerait au niveau du Pliocène, le Miocène constitue également un écran imperméable pour la nappe du Calabrien.

La plaine de Bordjias, au Sud du plateau, est potentiellement en continuité hydraulique avec celui-ci. Elle constitue alors une partie de l'exutoire des eaux souterraines du plateau. On note également qu'au niveau de cette plaine, les grès calabriens sont saturés et forment une nappe captive.

2.7.3 Les aquifères secondaires

2.7.3.1 La nappe côtière

Entre la mer et la bordure du plateau existe une zone littorale à recouvrement sableux qui renferme une nappe phréatique. Cette petite nappe est alimentée par la pluviométrie, et par des fuites de la nappe du plateau. D'extension réduite et abondamment exploitée par de nombreux puits fermiers elle a des ressources peu importantes (D.E.M.R.H, 1978).

2.7.3.2 La plaine des Bordjias

Au sud de la ligne Ain Nouissy, Blad Touaria débute la plaine d'effondrement des Bordjias. Le Calabrien et les grès du Pliocène s'enfoncent rapidement sous des alluvions à prédominance argileuse. Le Calabrien semble disparaître vers le sud tandis que les grès pliocènes affectés de

nombreuses variations de faciès renferment une nappe captive. L'écoulement de cette nappe se fait vers le sud-ouest, son exutoire est ses possibilités sont assez mal connus (D.E.M.R.H, 1978).

Etage	Lithologie	Hydrogéologie	Degré de perméabilité
Quaternaire	<u>Formation continentale</u> Grès dunaires, limons, sable, croûte. <u>Formation marine</u> Grès jaunâtres à ciment calcaire et lumachelles, appartenant au sous étages Calabrien. Localement, ses grès s'intercalent avec des couches sableuses et argilo-sableuses.	Renferme la nappe libre du plateau	Perméabilité très élevée
Pliocène	<u>Formation marine</u> Grès marins appartenant aux sous étage Astien. Marnes bleues aux sous étages Plaisancien.	Forme avec marne du miocène, le mur du substratum de la nappe du plateau	Faible
Miocène	<u>Formation marine</u> Marnes bleues, argiles à tripolis, gypse, formation laguno-continentales.	Forme le substratum de la nappe du plateau	Faible
Crétacé	Petites grès quartzites et marne	Pas de nappe	Moyen à faible
Trias	Gypse, dolomie, marne		

Tableau 2. 2. Formations à potentiel hydrogéologique au niveau du plateau de Mostaganem (D.E.M.R.H, 1978).

2.8 Conclusion

La ville de Mostaganem est conçue sur un bombement côtier qui sépare une étroite bande littorale d'un plateau grés-sableux appelé « plateau de Mostaganem ». L'étude du milieu physique du plateau nous a permis de ressortir un ensemble important d'informations :

Du point de vue topographique, le plateau couvre une superficie de l'ordre de 700 Km² avec une altitude moyenne de 200 m par rapport au niveau de la mer, il présente un aspect tabulaire dans sa région centrale qui s'abaisse régulièrement vers l'Ouest en direction de la plaine de l'Habra et du Golf d'Arzew.

Du point de vue hydroclimatologique, la zone étudiée est régie par un climat méditerranéen, semi-aride à écoulement temporaire, caractérisé par une pluviométrie moyenne irrégulière et faible.

L'étude géologique révèle l'existence de deux types de formations. La première est allochtone, plus ancienne datée du Trias à l'Albien marquée par l'existence de deux types d'allochtonies (diapirs, nappes de charriages). La seconde est de type autochtone récente datée du Miocène à Quaternaire.

Sur le plan tectonique le plateau de Mostaganem est marqué par la présence d'une série d'ondulations orientées Nord-Est, Sud-Ouest.

Chapitre 3

Systemes d'Information Géographique

3.1 Introduction

L'évolution des problématiques environnementales, notamment celles liées à l'hydrogéologie, a augmenté les besoins en information géographique. L'accroissement de ces besoins combiné aux développements technologiques au cours des dernières décennies, explique le développement phénoménal des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Aujourd'hui, ils sont considérés comme des outils essentiels de gestion de l'environnement.

D'une part, les SIG contribuent à une utilisation plus flexible et plus efficace des données hydrogéologiques spatiales grâce à leurs diverses fonctions. D'autre part, l'établissement d'une carte hydrogéologique décisionnelle sous un environnement SIG est bénéfique à la gestion du territoire et contribue d'une façon active à la prise de décision.

En hydrogéologie, comme dans de nombreuses sciences, un SIG fournit non seulement un environnement flexible pour la gestion (acquisition, structuration, stockage, visualisation et diffusion) des données localisées, mais fournit également des capacités d'analyse spatiale pour mieux satisfaire les utilisateurs et ses exigences d'application. Ainsi, la possibilité d'analyse spatiale permet de considérer des données hétérogènes et apporte une solution simple pour le traitement de données spatialement référencées ou non. Les résultats peuvent être affichés sur une carte représentée automatiquement (Boussema, 1994).

3.2 Historique

La première application SIG, citée en épidémiologie est l'étude réussie du Dr John Snow (<http://www.sig-geomatique.fr/sig-sig.html>). Il s'agissait de l'épidémie de choléra à Soho, Londres en 1854 : il a marqué l'emplacement des malades sur un plan ainsi que les endroits où ils s'approvisionnaient en eau. Il a réussi à déterminer que c'était l'eau d'un puits qui était le foyer de contamination.

Dans les années 1960, il y avait trop de cartes de l'Afrique de l'Est pour trouver les meilleurs endroits pour créer de nouvelles installations forestières, alors l'idée d'utiliser des ordinateurs pour traiter les données géographiques (SIG) est née.

Historiquement, le terme SIG (Système d'Information Géographique) a été utilisé pour la première fois en 1963 par Tomlinson Roger, connu comme le père des systèmes d'information géographique.

La sensibilisation à l'environnement entraîne des progrès dans les technologies de l'information, permettant l'utilisation de techniques et de méthodes scientifiques et d'aménagement du territoire. Le suivi, la gestion et la conservation de la biodiversité sont également sources de

développement d'applications SIG. Depuis 1970, de nouvelles approches scientifiques interdisciplinaires et collaboratives ont émergé.

Maguire (1991) a distingué trois grandes périodes d'évolution du SIG:

- De la fin des années 50 jusqu'aux années 70 : début de l'informatique, première cartographie automatique.
- Milieu des années 70 - Début des années 80 : diffusion des outils de cartographie automatisée/SIG dans les institutions nationales (armée, cadastre, services topographiques, etc).
- Depuis les années 80 : croissance du marché des logiciels SIG, développement des applications SIG, mise sur le web et la généralisation de l'utilisation de l'information géographique (cartographie internet, calculs d'itinéraires routiers, GPS embarqués, etc.), la émergence des "logiciels libres".

Les SIG sont de plus en plus utilisés dans divers domaines : urbanisme (production de schémas directeurs, aménagement et gestion des plans d'occupation du sol), recherche économique et socio-économique (population, emploi, logement, etc.). Le SIG est également utilisé dans l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles, la protection de l'environnement (gestion des déchets et de la pollution, gestion des zones naturelles), les géosciences (géologie, géodésie, pédologie, etc.), dans les applications militaires, l'agriculture (étude des pollutions agricoles, protection contre les incendies et les inondations), dans l'hydrographie, l'océanographie, et beaucoup d'autres domaines (Chakhar S., 2006).

3.3 Définition d'un SIG

Plusieurs définitions ont été proposées pour le terme SIG, chacune reflétant une perspective différente et se référant à une discipline spécifique. Certaines se concentrent sur des aspects techniques, d'autres sur des aspects de gestion de bases de données, et d'autres encore sur des aspects organisationnels et institutionnels. Nous avons retenu les définitions suivantes du centre français CNIG (Conseil National d'Information Géographique):

Le terme "Système d'Information Géographique" désigne un système de saisie, de stockage, de validation, d'intégration, de manipulation, d'analyse et de visualisation de données à référence spatiale. Il comprend en principe des bases de données localisées et des logiciels d'application appropriés. L'une des principales caractéristiques des SIG est leur capacité à intégrer des données provenant de différentes sources (Laurencin B., 2008).

Malgré les divergences d'opinion sur la définition des SIG, un point sur lequel tous les auteurs semblent s'accorder est qu'un SIG est un outil de gestion de données géoréférencées et sa

caractéristique principale est sa capacité à faire des analyses spatiales et la cartographie automatique des résultats (Goodchild, 1992).

Information géographique et base de données géographiques sont les deux termes essentiellement utilisés dans un SIG.

3.3.1 Information géographique

Une information géographique c'est une information qui contient une référence à un lieu (un point précis du territoire, une infrastructure linéaire ou un périmètre donné).

Il existe de nombreuses sources d'informations géographiques, notamment :

- Les cartes : c'est la source la plus ancienne, elles donnent un aperçu général des objets et des phénomènes présents dans la zone représentée. Une légende est toujours associée à une carte, ce qui permet l'interprétation des différents symboles utilisés pour représenter toutes les composantes de la zone concernée.
- Les Images : elles constituent également une importante source d'informations géographiques. Elles sont principalement utilisées pour mettre à jour des cartes et des bases de données géographiques, permettant une représentation précise et réaliste de la surface terrestre.
- Les textes : Les informations géographiques peuvent provenir d'un texte ou d'un fichier de données, elles peuvent provenir d'enquêtes, d'observations de terrain, de statistiques, de fichiers administratifs, etc.
- Les bases de données numériques : Les informations géographiques peuvent être obtenues à partir de bases de données numériques.

3.3.2 Base de données géographiques

Une base de données géographiques décrit les éléments du territoire à travers des couches d'informations qui sont définies par 3 niveaux :

- *Niveau sémantique (descriptif)* : c'est des informations textuelles, qualitatives, quantitatives sur une entité géographique, ce sont tous des attributs de l'objet (par exemple le nom d'une rue, d'une ville, etc.).
- *Niveau géométrique* : c'est des informations qui décrivent la forme et la position de l'objet à la surface de la Terre, exprimées dans un système de coordonnées explicite.
- *Niveau topologique* : ce sont des informations décrivant les relations entre les entités géographiques d'une même zone. Elles font référence aux notions de superposition, d'adjacence, d'intersection, d'inclusion (par exemple l'inclusion d'une parcelle dans une commune, l'adjacence entre les différents nœuds des tronçons, etc.).

3.4 Composantes et fonctionnalités d'un SIG

3.4.1 Composantes d'un SIG

En plus de l'outil informatique qui traite les données, un système d'information géographique intègre différentes composantes qui font la spécificité d'un système complet (figure 3.1):

- *Le matériel informatique* : le SIG fonctionne actuellement sur une variété d'ordinateurs: des serveurs de données aux ordinateurs de bureau en réseau ou autonomes.
- *Le logiciel SIG* : un SIG est considéré comme un logiciel qui fournit les outils et les fonctionnalités nécessaires pour stocker, analyser et afficher toutes les informations.
- *Les données organisées en bases* : Les données sont la partie la plus importante du SIG. Les données géographiques et les données attributaires associées peuvent être compilées en interne ou obtenues auprès de producteurs de données.
- *Les méthodes* : La mise en œuvre et l'exploitation d'un SIG ne peuvent être envisagées sans le respect de quelques règles et procédures propres à chaque organisme.
- *Les ressources humaines « les utilisateurs »* : le SIG s'adresse à une large communauté d'utilisateurs et en particulier à ceux qui traitent de l'information géographique.

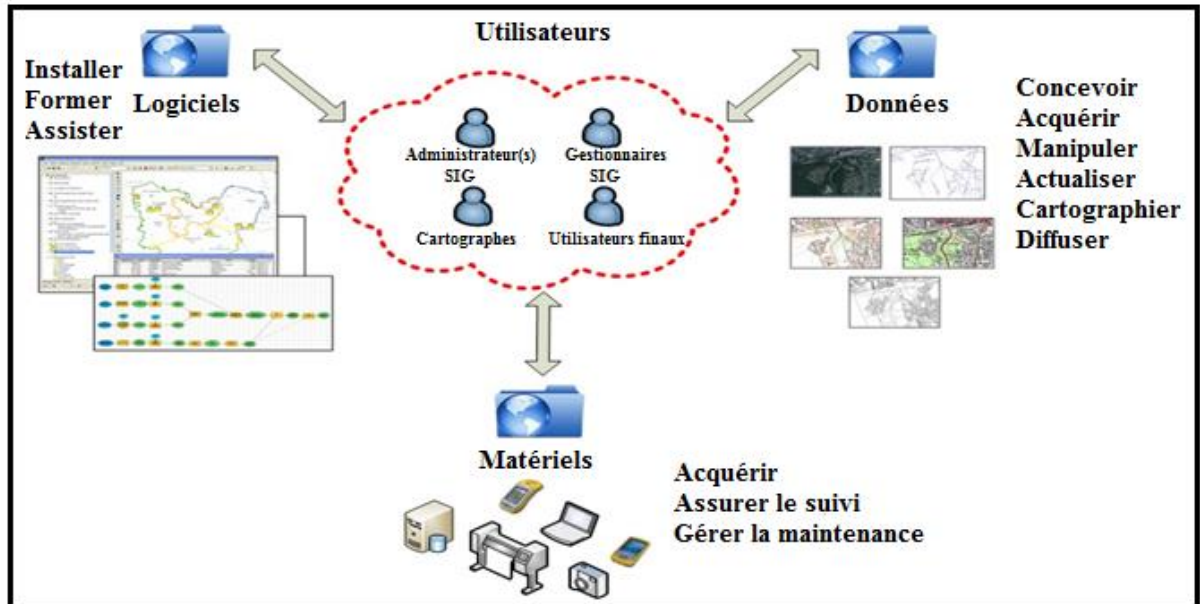


Figure 3. 1. Composantes d'un SIG

3.4.2 Fonctionnalités d'un SIG

Les systèmes d'informations géographiques intègrent généralement cinq fonctionnalités de base (figure 3.2), habituellement appelées les "5 A" (Bard S., 2004; Bamba et al., 2005):

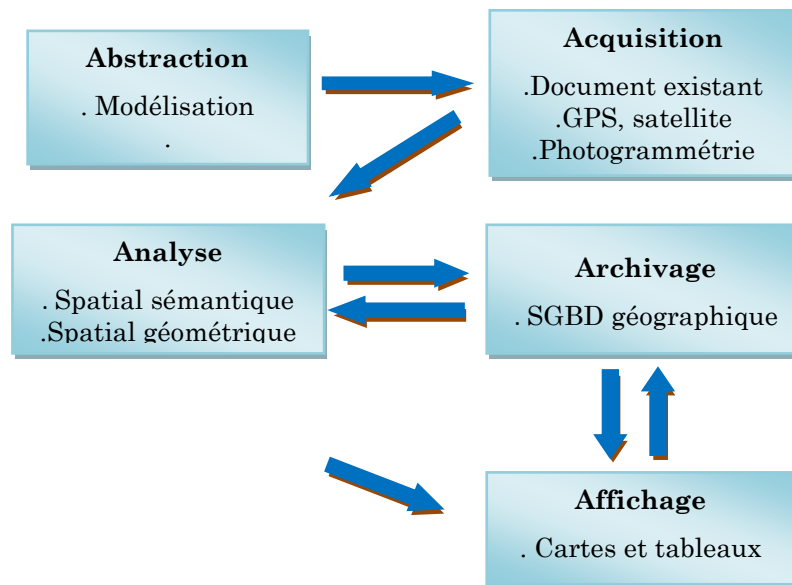


Figure 3. 2. Fonctionnalités d'un SIG

- **Abstraction** : C'est modéliser le monde réel. L'établissement du schéma conceptuel de données permet la modélisation de la base de données par la définition des objets (classes d'objets), leurs attributs et leurs relations.
- **Acquisition** : C'est le processus de collecte de données. Les fonctions de collecte consistent à saisir les objets géographiques, à saisir leur forme, leurs attributs et leurs relations. Il existe différents types d'acquisition de données, selon la source (acquisition à partir des documents existants, à partir de photos aérienne, à partir de données alphanumériques, ou même à partir du terrain (GPS, levé topographique...)).
- **Archivage** : C'est l'une des fonctionnalités les moins visibles pour l'utilisateur. Cela dépend de l'architecture du logiciel et de l'intégration ou non d'un système de gestion de base de données (SGBD) relationnel ou orienté objet. Il faut opter pour une architecture qui facilite le stockage et la récupération des données collectées.
- **Analyse** : L'objectif des des systèmes d'informations géographiques n'est pas seulement la création d'un plan ou d'une carte ou la gestion de données. Il assure aussi des fonctions de traitement, de croisement et de transformation des données. C'est ce qu'on appelle l'analyse spatiale des données, qui peut être sémantique ou géométrique.
- **Affichage** : C'est l'affichage des résultats des requêtes, la création de cartes, la détection des relations spatiales entre les objets et la visualisation des données sur les écrans d'ordinateurs.

3.5 Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG

On distingue deux modes de représentation des données géographiques dans un SIG: le mode vecteur et le mode raster (voir figure 3.3).

3.5.1 Mode vecteur

C'est un mode de représentation dans lequel le plan est composé d'éléments géométriques de base :

- Points : forage, points géodésiques...
- Lignes (polylines) : routes, rivières, oueds, chemins ferroviaires...
- Polygones ("surfaces") : parcelles, communes...

Chaque élément géométrique possède des attributs (nom du forage, type de parcelle, largeur de rivière, nombre d'habitants, valeur mesurée, etc.). Suivant l'échelle d'analyse, un cours d'eau pourra être une ligne ou bien un polygone comme une ville pourrait être représentée par un point ou un polygone.

3.5.2 Mode raster

Le mode raster correspond à une division régulière de l'espace sous forme de cellules ou de mailles généralement carrées appelées pixels, qui définissent la précision minimale de la structure. Chaque cellule se voit attribuer une valeur spécifique (débit, altitude, profondeur, etc.).

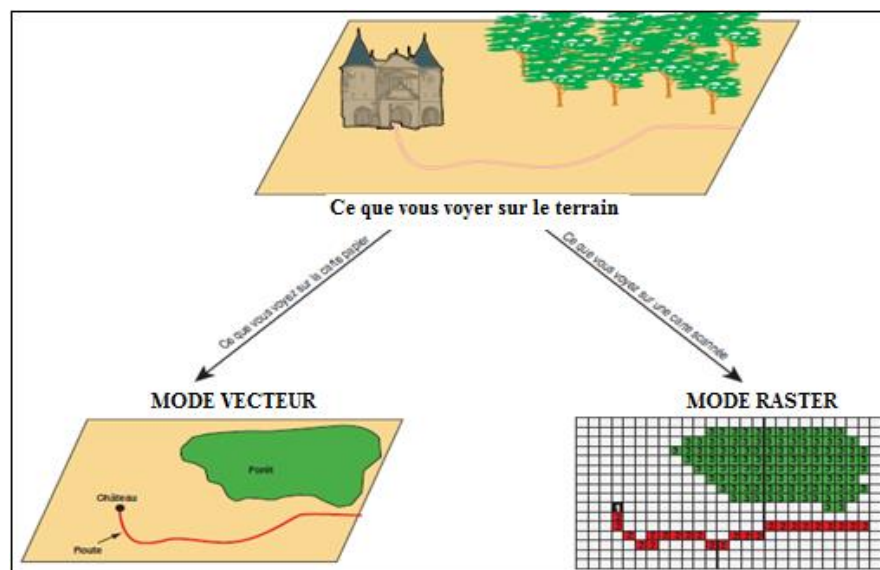


Figure 3. 3. Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG.

3.5.3 Conversions du mode vecteur au mode raster

La plupart des SIG sont capables de convertir des données d'un format à un autre. La figure 3.4 illustre le passage d'une représentation vecteur vers une représentation raster.

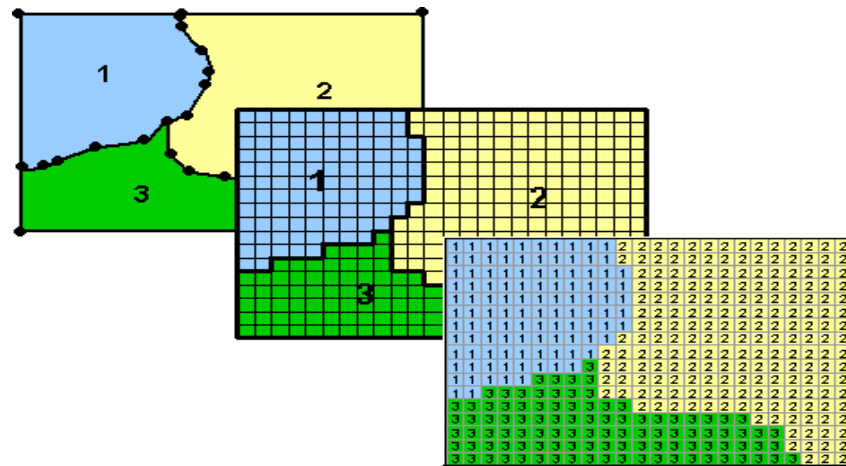


Figure 3. 4. Passage du mode vecteur au mode raster.

3.6 Notion de couches (niveaux, strates ou layers)

Les SIG décomposent le terrain (zone à représenter) en couches ou thèmes. Par exemple, un SIG peut être décomposé en couches de données suivantes, :

- Routes représentées sous la forme d'axes centraux,
- Zones d'occupation du sol qui représentent la végétation, les zones résidentielles, etc.,
- Plans d'eau, forages, puits et rivières,
- Polygones de parcelles qui représentent les villes et les subdivisions administratives,
- Photo aérienne ou image satellitaire qui représente la zone d'étude.

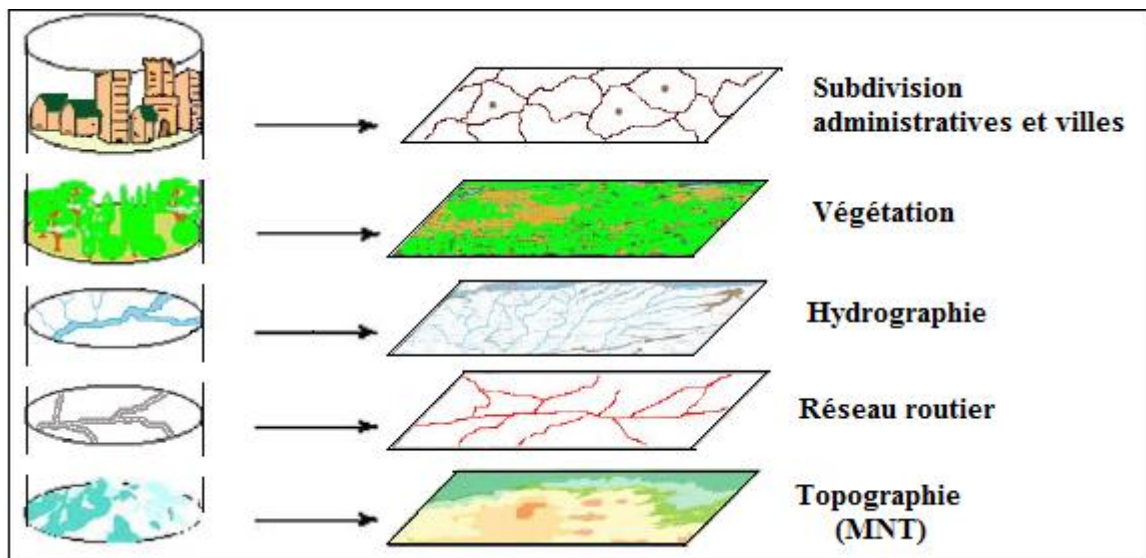


Figure 3. 5. Exemple de couches dans un SIG.

3.7 Avantages et inconvénients des SIG

Les SIG contiennent des fonctions d'analyse automatisées de l'information géographique, qui servent à faciliter les tâches d'interprétation des données. Cependant, ces systèmes d'informations présentent certains inconvénients et avantages qui sont résumés dans les deux sections suivantes:

3.7.1 Avantages

- Les données sont stockées sous forme compressée : elles peuvent être récupérées très rapidement et à moindre coût.
- L'outil informatique permet d'améliorer la précision et la rapidité d'exécution de certaines opérations pouvant être réalisées manuellement, par exemple: certaines mesures spatiales, les transformations géométriques, l'élaboration de cartes sur papier.
- La mise à jour est rapide, c'est même possible en temps réel: cela permet d'utiliser le SIG comme outil de suivi.
- Certaines analyses difficiles ou impossibles à effectuer manuellement peuvent être réalisées à moindre coût : extraction de pente, valeurs d'irradiance solaire, délimitation de bassins versants à partir d'un MNT, etc.

3.7.2 Inconvénients

Le principal inconvénient des SIG c'est le coût: le coût d'achat du matériel (ordinateurs) et du logiciel. Les coûts d'acquisition de données existantes (cartes), de conversion de format et de prétraitement de données déjà numérisées sont nettement plus élevés.

3.8 Logiciels SIG

Il y a actuellement de nombreux logiciels SIG. Les sociétés les plus connues qui commercialisent des logiciels SIG sont:

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_logiciels_SIG)

- La société ESRI (Environmental Systems Research Institute) qui commercialise divers produits de la famille ArcGIS. Cette société développe un système SIG complet. Elle a été créée en 1969, par Jack Dangermond (président et détenteur de Esri en 2013) comme société de consultants en aménagement du territoire. Le siège de la société se trouve aux États-Unis, à Redlands, en Californie (<http://www.esri.com/>).
- La société ACXIOM (ou ACXIOM Corporation) qui commercialise Mapinfo en France;
- la société Intergraph qui commercialise le logiciel GeoMedia Pro;
- la société française GeoConcept qui commercialise le logiciel GeoConcept.
- La société Clark Labs de l'université Clark (université américaine fondée en 1887, située à Worcester au Massachusetts), commercialise le logiciel IDRISI qui est un logiciel SIG, spécialement basé sur le mode raster (image).

3.8.1 Présentation du logiciel ArcGIS

3.8.1.1 Naissance et historique d'ArcGIS

Le logiciel SIG utilisé dans cette thèse est celui de la firme ESRI, c'est le logiciel ArcGIS, le leader mondiale des logiciels SIG présents actuellement sur le marché (Denis A., 2016). Ce logiciel est choisi pour sa robustesse, ses fonctionnalités étendues, sa convivialité et son utilisation répandue dans divers domaines, notamment, celui des sciences de la terre.

ArcGIS est une composition de logiciels d'information géographique développée par la société américaine ESRI.

ESRI lance la version ArcGIS 8.0, dans les années 99, exploitable sous l'environnement Microsoft Windows. ArcGIS assemble l'interface utilisateur visuelle d'ArcView GIS 3.x à quelques éléments d'Arc/INFO version 7.2. Cette combinaison donna naissance à la suite ArcGIS. Un nouvel outil de gestion des données appelé ArcCatalog fait partie d'ArcGIS. La sortie de la suite d'ArcGIS fait des changements dans les offres logicielles d'ESRI car tous les produits sont regroupés sous une architecture unique.

ArcGIS 9 est sorti en 2004 et inclut ArcGIS Server et ArcGIS Engine. Une version 10 d'ArcGIS est disponible depuis fin 2010 (<http://www.esrifrance.fr/arccgis.aspx>).

3.8.1.2 Composants d'ArcGIS

Le logiciel ArcGis se compose de trois applications principales :

- ArcCatalog : pour la gestion des données, la documentation et la recherche dans les bases de données (spatiales ou non).
- ArcMap : pour l'affichage, la cartographie, la modification, l'interrogation et l'analyse des données géographiques.
- ArcToolbox : pour les conversions de données (projections, formats,) et les opérations de géotraitement (par exemple, superposition).

En utilisant simultanément ces applications et ces interfaces, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus compliquée.

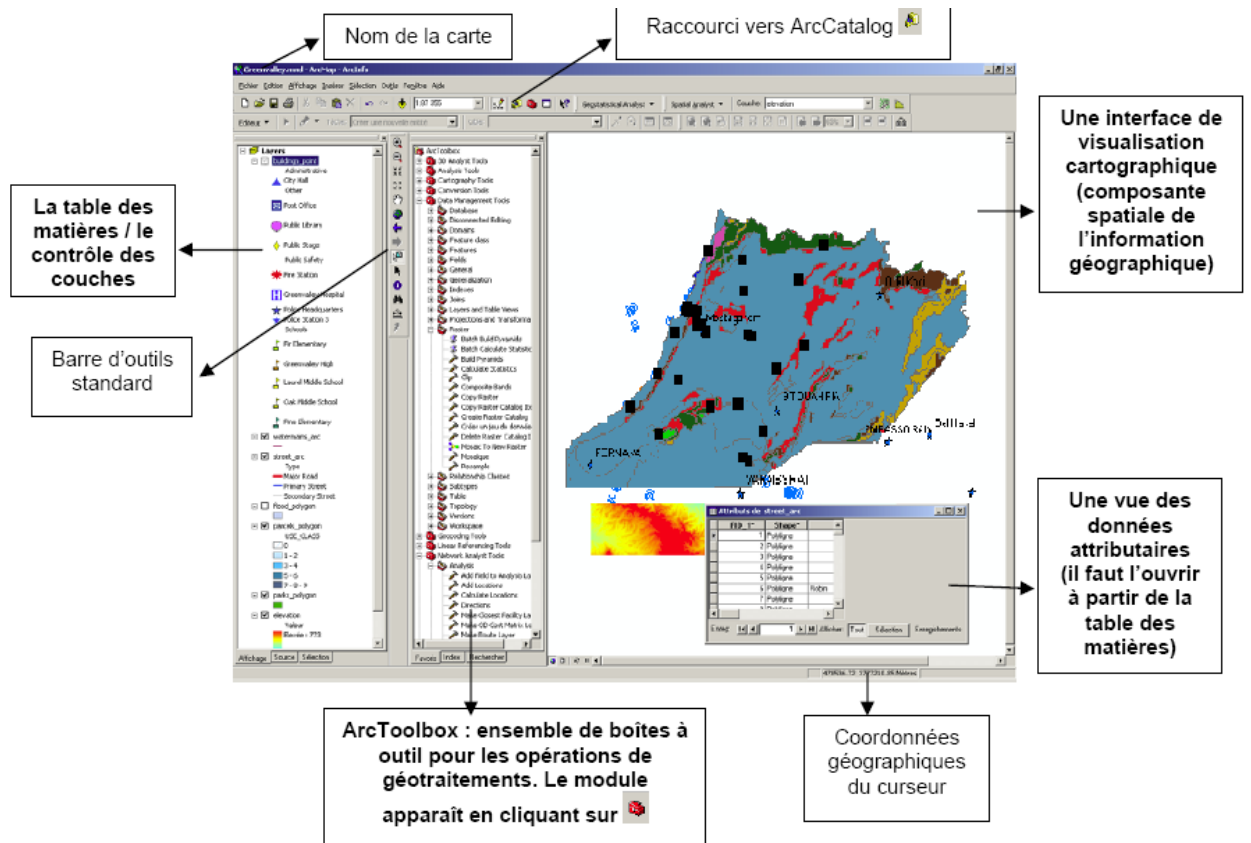


Figure 3. 6. Vue sommaire de l'environnement d'ArcMap.

3.8.2 Outils de superposition dans ArcGIS

3.8.2.1 Notion de superposition des couches (overlay)

Les différentes couches d'information contenues dans un SIG peuvent être combinées si elles partagent le même système de coordonnées. Par conséquent, le géoréférencement permet l'association ou la superposition des jeux de données sur une carte à l'aide d'opérations de géotraitement, telles que la superposition de couches (overlay).

En général, il y a deux méthodes d'analyse de superposition : la superposition d'entités géographique (superposition de points, lignes ou polygones) et la superposition de données rasters. L'analyse de superposition, pour trouver des emplacements qui répondent à certains critères, est souvent plus efficace si on utilise la superposition raster (même si on peut le faire avec des données d'entités). Le choix dépend du mode de stockage des données, qu'elles soient déjà stockées en tant que vecteur ou en tant que raster. Il peut être utile de convertir les données d'un format à un autre pour effectuer l'analyse de superposition.

Les outils de superposition vectorielle dans ArcGIS, se trouvent dans la boîte à outils *Analyse* dans le jeu d'outils *Superposition*. Les différents outils ont un concept similaire. Ils diffèrent par les types d'entités qu'on peut superposer, si on peut ou non superposer plusieurs couches à la fois, et quelles entités sont conservées dans la couche résultante.

On accède aux outils de superposition raster dans ArcGIS, à travers des jeux d'outils différents, disponibles dans la boîte à outils *SpatialAnalyst*.

3.8.2.2 Notion de superposition floue dans ArcGIS

Le logiciel ArcGis comprend un outil de superposition floue. Cet outil permet d'analyser la possibilité qu'un phénomène appartienne à plusieurs ensembles dans une analyse de superposition multicritères. La superposition floue détermine les relations entre les membres des différents ensembles. (<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-overlay-works.htm>).

Le type de superposition permet de répertorier les méthodes disponibles pour la combinaison des données selon l'analyse de la théorie des ensembles.

Chaque méthode examine si chaque cellule appartient aux différents critères en entrée. Les méthodes disponibles dans ArcGis sont: ET flou, OU flou, Produit flou, Somme floue et Gamma flou. Chaque approche donne un aspect différent de l'appartenance de chaque cellule aux différents critères d'entrée.

- *ET flou*: c'est un type de superposition qui renvoie la valeur minimale des ensembles auxquels appartient la position de la cellule.
- *OU flou*: c'est un type de superposition qui renvoie la valeur maximale des ensembles auxquels appartient la position de la cellule.
- *Produit flou*: c'est un type de superposition qui multiplie, pour chaque cellule, chacune des valeurs floues pour la totalité des critères.
- *Somme floue*: c'est un type de superposition qui ajoute les valeurs floues de chaque ensemble auquel appartient la position de la cellule.
- *Gamma flou*: c'est un produit algébrique de la somme floue et du produit flou, tous les deux élevés à la puissance de gamma.

3.9 Système d'Aide à la Décision (SAD)

3.9.1 Définition

Un SAD est un outil permettant d'assister le décideur dans sa prise de décision. En effet, un processus de décision ne peut pas être entièrement automatisable (Pomerol, 1992). L'objectif principal d'un Système d'Aide à la Décision est d'améliorer la qualité des décisions en fournissant un soutien informatique et analytique.

3.9.2 Caractéristiques d'un Système d'Aide à la Décision

Les différentes caractéristiques d'un SAD sont les suivantes :

1. Collecte de données

Les Systèmes d'Aide à la Décision collectent, stockent et gèrent des données provenant de différentes sources. Ces données peuvent être structurées ou non structurées.

2. Modèles analytiques

Ils intègrent des modèles analytiques et des techniques statistiques pour analyser les données et fournir des informations pertinentes pour la prise de décision. Cela peut inclure des méthodes telles que l'analyse prédictive, la modélisation de scénarios, l'optimisation, etc.

3. Interface utilisateur

Les Systèmes d'Aide à la Décision offrent des interfaces conviviales qui permettent aux utilisateurs de poser des questions, de visualiser des données, d'explorer des scénarios et d'interagir avec le système de manière intuitive.

4. Support à la prise de décision

Ils fournissent des informations, des analyses et des recommandations pour soutenir les processus de prise de décision. Cela peut inclure la présentation de rapports, de tableaux de bord, de visualisations de données et d'autres outils interactifs.

5. Personnalisation

Certains Systèmes d'Aide à la Décision offrent des fonctionnalités de personnalisation, permettant aux utilisateurs de configurer le système en fonction de leurs besoins spécifiques et de leurs préférences.

6. Gestion des Risques

Ils peuvent intégrer des mécanismes de gestion des risques pour évaluer les conséquences potentielles des différentes décisions et aider à atténuer les risques.

7. Automatisation

Certains Systèmes d'Aide à la Décision peuvent automatiser certaines étapes du processus de prise de décision, en particulier pour des tâches récurrentes ou standardisées.

3.10 Système d'Aide à la Décision Spatial (SADS)

3.10.1 Définition

Un Système d'Aide à la Décision Spatial (SADS) est une catégorie spécifique de Système d'Aide à la Décision (SAD) qui se concentre sur la prise de décision impliquant des données géographiques ou spatiales. Ces systèmes sont conçus pour aider les utilisateurs à analyser, interpréter et prendre des décisions basées sur des informations ayant une composante géographique.

3.10.2 Caractéristiques d'un Système d'Aide à la Décision Spatial

Voici quelques caractéristiques spécifiques des Systèmes d'Aide à la Décision Spatial :

1. Gestion des données géospatiales

Ils intègrent des données géographiques provenant de sources telles que les systèmes d'information géographique (SIG), les bases de données spatiales, les capteurs géospatiaux, etc.

2. Visualisation géographique

Ces systèmes offrent des outils de visualisation géographique pour représenter des données sous forme de cartes, de graphiques, de modèles 3D, ou d'autres représentations spatiales.

3. Analyse spatiale

Les SAD spatiaux incluent des fonctionnalités avancées d'analyse spatiale permettant d'explorer les relations et les modèles dans l'espace. Cela peut inclure des analyses de proximité, des analyses de réseau, des analyses de couche, etc.

4. Modélisation de scénarios

Ils permettent aux utilisateurs de créer et d'évaluer différents scénarios spatiaux pour comprendre les implications géographiques de différentes décisions.

5. Intégration de données temporelles

Certains SAD spatiaux intègrent également des composantes temporelles pour prendre en compte l'évolution des données dans le temps.

6. Intégration avec les systèmes d'information géographique (SIG)

La plupart des SAD spatiaux sont intégrés avec des SIG, profitant ainsi des fonctionnalités avancées de gestion de données géographiques.

3.11 Conclusion

Les SIG offrent un moyen puissant de visualisation, d'analyse et de compréhension des phénomènes liés à l'emplacement géographique. Ils offrent des outils puissants pour la prise de décision, facilitant la compréhension des relations spatiales et la résolution de problèmes complexes.

Les Systèmes d'Aide à la Décision Spatiaux (SADS) visent à améliorer l'efficacité des décisions en fournissant des informations précieuses et des analyses basées sur des données géographiques. Ils sont largement utilisés dans divers secteurs tels que les affaires, la santé, la finance, la logistique, la planification urbaine, la gestion des ressources naturelles, etc.

Chapitre 4

Concepts de la logique floue

4.1 Introduction

La logique floue est un outil puissant pour modéliser et traiter les imperfections dans les connaissances, qu'ils s'agissent d'incertitude ou d'imprécision. Elle offre une approche plus flexible et nuancée pour la représentation et la manipulation de l'information dans des situations réelles où les concepts ne sont pas toujours clairement définis.

4.2 Imperfections dans les connaissances

4.2.1 Différents types d'imperfections dans les connaissances

Tout processus d'aide à la décision comporte des incertitudes ou des imperfections de l'information (Bouchon-Meunier B., 1995).

Selon Bouchon-Meunier B., (1995), il y a deux types de raisons à ces imperfections :

- Le premier type est lié à l'acquisition de connaissances à partir du réel, incluant la phase d'observation par des outils ou des intermédiaires humains, souvent sujets à des erreurs, des imprécisions ou des incertitudes. La deuxième étape implique la représentation des nombres, soit par le langage naturel, soit par la logique, comme avec une précision fixe ou des formules mathématiques. L'observation et la représentation entraînent une perte d'information liée au système traité, d'autant plus importante que le système est compliqué.
- Le second type est lié au manque de rigueur ou de flexibilité inhérent au système lui-même et à son fonctionnement. Cela est vrai pour toutes les caractéristiques des phénomènes naturels, telles que la durée de maturation des fruits, la taille des animaux adultes, le passage progressif et non strict du jour à la nuit. C'est également le cas pour certains systèmes artificiels, comme les ascenseurs où la charge maximale est exprimée en kilogrammes pour simplifier, mais quelques grammes peuvent être ajoutés sans problèmes majeurs.

Ainsi, la nature des informations incomplètes est différente. Bouchon-Meunier (1995) en distingue trois:

- **L'incertitude** implique des doutes sur la validité des connaissances. Cela peut provenir du constat de la relative fiabilité des intermédiaires, du manque de confiance en soi ou de la possibilité de se tromper ("je pense que la qualité de l'eau est bonne"), voire de la difficulté à obtenir ou à vérifier les connaissances (incertitude sur l'ennemi, par exemple, comme c'est le cas dans les milieux militaires). L'incertitude existe également dans le cas des prévisions (par exemple, la météorologie).

- **L'imprécision** correspond à des difficultés d'énoncé des connaissances, soit parce que les connaissances numériques sont peu connues, soit parce que des termes en langage naturel sont utilisés pour caractériser le système de manière ambiguë. Le premier cas est dû au manque d'instruments d'observation (3000 à 4000 arbres fruitiers), à des erreurs de mesure (pH de l'eau à moins de 1%), voire à des connaissances flexibles (la taille d'un adulte est environ entre 1.52 et 2 mètres). Le deuxième provient de l'expression spontanée de connaissances (pente douce, grande surface, proche du puits) ou de l'utilisation de catégories aux limites mal définies (bonne, assez bonne, mauvaise).
- **L'incomplétude** est le manque de connaissances ou la connaissance partielle de certaines caractéristiques du système. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certaines informations (parfois des fichiers de terrain partiellement remplis) ou à des problèmes d'obtention de connaissances (images avec des parties floues). Ils peuvent aussi être liés à l'existence de connaissances générales sur l'état du système, ce qui est généralement vrai, avec des exceptions non dénombrables ou prévisibles selon les circonstances (par exemple, le plus souvent la route nationale N°11 est très fréquentée à moins d'événements spéciaux ou des travaux). L'incomplétude est souvent liée à la présence de connaissances tacites, par exemple lors de la recherche d'informations auprès d'experts.

Il convient de noter que ces formes d'imperfections ne sont pas indépendantes les unes des autres. L'incomplétude conduit à l'incertitude. Par exemple : « tous les pixels sur l'image X qui entourent le pixel A(25,45) présente une valeur numérique de 60 (sur une échelle de 0 à 255) » qui représente le sol nu. Seulement, on ignore la valeur de A, donc il est presque certain, mais non absolument sûr que A représente du sol nu.

Pareillement l'imprécision liée à l'incomplétude peut entraîner des incertitudes lors de son manipulation. Par exemple, « si le débit d'eau dépasse 17 l/s, il faut choisir une conduite de diamètre de 500mm », or la connaissance dont on dispose est imprécise et incomplète à savoir : « le débit d'eau est considérable », donc quel est le diamètre pour lequel il faut opter?

4.2.2 Modélisation des imperfections dans les connaissances

Il existe plusieurs langages qui peuvent être utilisés pour modéliser des connaissances imprécises, incertaines et incomplètes, à savoir :

- Théorie des probabilités : c'est la plus ancienne. Elle a été introduite par Pascal et Fermat au XVIIe siècle et formalisée par Bernouilli (in Bouchon-Meunier B., 1995). Elle traite de l'incertitude de nature aléatoire et implique la mesure des probabilités et des distributions de

probabilité. Des probabilités sont attribuées aux événements si des connaissances suffisantes sont disponibles. Dans le cas contraire, on est amené à attribuer à l'événement des coefficients de possibilité et de nécessité (théorie des possibilités), souples du point de vue de l'usage, mais moins riches que le cas de la probabilité. La théorie peut donner un degré de confiance à plusieurs événements susceptibles de se produire dont les vues sont très claires mais divergentes.

- Modélisation par des *intervalles* par Moore R.E. (1966). Elle est utilisée dans le cas particulier de données numériques approximatives.
- Théorie de *l'évidence* par Schafer G. (1976), Elle repose sur la détermination d'une fonction de croyance pour modéliser et quantifier le degré de confiance attribué à des faits dont la probabilité d'occurrence est inconnue. On identifie également une fonction de plausibilité qui permet de décider de la probabilité qu'un événement se produise.
- La théorie de *l'ambiguïté* par Einhorn et Hogarth (1985) : est l'imprécision de la probabilité. Il s'agit d'une situation intermédiaire entre le risque au sens strict (une distribution unique avec des paramètres connus) et l'incertitude plus fondamentale, où plusieurs distributions sont possibles mais le meilleur ajustement ne peut pas être spécifié.
- La théorie des *sous-ensembles flous* par Zadeh (1965) (Bouchon-Meunier B., 1995) : se présente comme un outil privilégié pour modéliser des situations imprécises.
- La théorie des *possibilités* par Zadeh (1978) (Bouchon-Meunier B., 1995) : Peut gérer des incertitudes de nature non probabiliste, ce que la théorie des sous-ensembles flous ne permet pas. Cela nécessite une mesure de la probabilité, de la nécessité et de la distribution de la probabilité. Cette théorie donne un intervalle dans lequel il existe un degré de confiance dans l'occurrence possible de plusieurs événements dont les avis sont cohérents mais imprécis.

Le cadre conjoint de la théorie des sous-ensembles flous et de la théorie des possibilités constitue la logique floue. C'est le seul cadre capable de gérer l'inexactitude et l'incertitude. Il autorise également le traitement de certaines incomplétudes. C'est le seul cadre capable de gérer à la fois des connaissances numériques et des connaissances exprimées en notation quantifiée en langage naturel (Bouchon-Meunier B., 1995).

Les sections suivantes présentent quelques notions et concepts fondamentaux de la logique floue.

4.3 Concepts de base de la logique floue

Dans la plupart des cas, le manque de données et/ou la disponibilité de données inexactes ou incomplètes nous amènent à utiliser des variables linguistiques ou de nombres flous pour formuler ces données et exprimer notre raisonnement habituel. La logique floue se comporte comme une logique graduelle, qui se rapproche beaucoup de la perception humaine du monde réel.

Son objectif est de proposer des concepts, des techniques et des méthodes formellement rigoureuses pour représenter et traiter des connaissances et des données ambiguës, c'est-à-dire incluant l'imprécision dans le contenu de l'information, l'incertitude dans l'authenticité de l'information et la subjectivité. D'autres synonymes tels que connaissances mal spécifiées, mal décrites, imparfaites, vagues, qualitatives, linguistiques, partielles, incomplètes, approximatives ou approchées couvrent tous le même sens du flou.

4.3.1 Historique et définitions

Pendant longtemps, les êtres humains ont essayé de contrôler l'incertitude et l'imperfection inhérentes à leur nature. La première véritable manifestation de la volonté de formaliser la prise en compte des savoirs incertains est le développement de la théorie des probabilités au XVIIe siècle (Bouchon-Meunier B., 1995). Mais la probabilité ne peut pas surmonter l'incertitude psychologique et linguistique. Puis la logique floue est apparue dans le laboratoire de Lotfi Zadeh à Berkeley en 1965 avec la théorie des sous-ensembles flous, puis en 1978 avec la théorie des possibilités. Aujourd'hui, ces deux théories constituent la logique floue.

La logique floue permet de formaliser des imprécisions dues à la connaissance globale de systèmes très complexes et la représentation linguistique du comportement d'un système (Merabti, 2008). Ainsi, elle permet la standardisation de la description du système et du traitement des données, à la fois numériquement et via l'expression par des qualifications linguistiques.

4.3.2 Sous-ensembles flous

Dans la théorie des ensembles classiques, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est définie par la valeur logique standard: 1 si l'élément appartient au sous-ensemble, 0 sinon.

Dans la théorie des ensembles flous, un élément peut appartenir en partie à un sous-ensemble. Le concept de sous-ensembles flous est introduit pour éviter les sauts brusques d'une classe à l'autre (par exemple de la classe noire à la classe blanche). Il permet d'autoriser des éléments d'appartenir à aucune classe (à être gris par exemple), ou d'appartenir en partie à chacune des

deux classes (dans le cas du gris foncé: il appartient à la classe noire avec un fort degré et à la classe blanche avec un faible degré) (Bouchon-Meunier B., 1995).

Le concept de sous-ensemble flou permet le traitement :

- De catégorie aux limites mal définies (comme « centre ville », « nouveau »).
- De situation intermédiaire entre le tout et le rien (« presque blanc »).
- Les passages progressifs d'une propriété à une autre (de « court » à « long » suivant la longueur).
- De valeur approximative (environ 3 Km).
- De classe en évitant l'utilisation arbitraire de limites rigides (il est difficile de dire qu'un magasin situé à 600 m de l'école en est proche, mais qu'à 5km il en est éloigné).

Il n'y a pas d'ensemble flou au sens propre. Chaque ensemble considéré est classique et bien défini. Le terme ensemble flou est souvent utilisé à la place de sous-ensemble flou, par abus de langage, qui est la traduction du terme original de « fuzzy set ».

4.3.2.1 Définition d'un sous-ensemble flou

Soit un ensemble X de référence ou un espace de points, également, appelé un univers de discours et soit x un élément de X . Les éléments de X qui possèdent une certaine propriété constituent un sous-ensemble A de X , au sens habituel de la théorie des ensembles. On dit que c'est un sous-ensemble classique et on note $\text{prop}(A)$ la propriété associée.

- Un sous-ensemble classique A de X est défini par une fonction caractéristique μ_A qui prend la valeur 0 pour les éléments de X n'appartenant pas à A et la valeur 1 pour ceux qui appartiennent à A : $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$

- Un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque x de X , le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1, avec lequel x appartient à A :

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1] \text{ (Bouchon-Meunier B., 1995).}$$

Dans le cas particulier où $\mu_A(x)$ ne prend que des valeurs égales à 0 ou 1, le sous-ensemble flou A est un sous-ensemble classique de X . Un sous-ensemble classique est un cas particulier de sous-ensemble flou.

Ainsi, un sous-ensemble flou A dans X peut être représenté par un ensemble de couples classés (Sbili, 2015). Un sous-ensemble flou est formulé comme suit :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \text{ avec } \mu_A: X \rightarrow [0,1], \forall x \in X \quad (4.1)$$

4.3.2.2 Fonction d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble "vrai" ou "faux" de la logique binaire traditionnelle, la logique floue permet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un sous-ensemble flou est représenté par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur exacte de la fonction d'appartenance associée à une valeur de la variable est notée μ et est appelée "degré d'appartenance".

Dans un domaine discret $X = \{x_i / i=1, 2, \dots, n\}$ ou continu, un sous-ensemble flou A de X peut être déterminé par un ensemble de paires : degré d'appartenance / élément.

La notation suivante est souvent utilisée pour représenter le sous-ensemble flou A, bien qu'il ne se rapporte à aucune idée d'addition ou d'intégrale. Elle indique pour tout élément x de X son degré d'appartenance $\mu_A(x)$ à A :

Notation : $A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x$, si X est dénombrable,

$$A = \int_X \mu_A(x) / x, \quad \text{si X est non dénombrable}$$

Exemple 1 : Si X est un ensemble des profondeurs, on peut définir le sous-ensemble ordinaire A des profondeurs allant de 20m à 80m. On peut aussi définir le sous-ensemble flou A « avoir une cinquantaine de mètres de profondeur ».

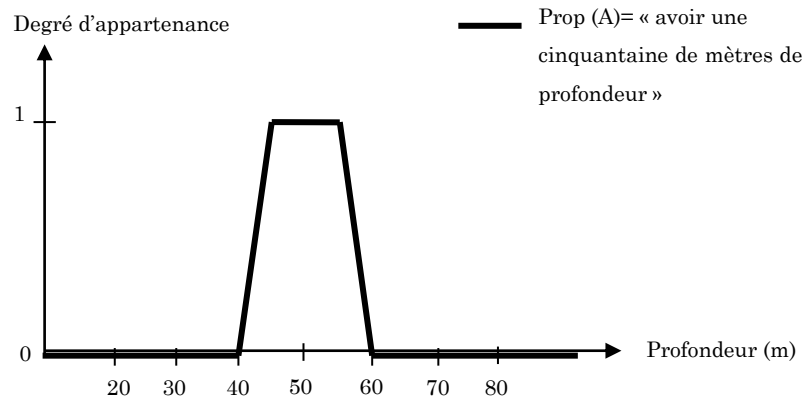


Figure 4. 1. Exemple de sous-ensemble flou

Exemple 2 : Si X est un ensemble des puits "P" puisant leurs eaux souterraines d'une nappe phréatique avec des débits différents. (Q (l/s) étant le débit de chaque puits: $Q_{P1}=5l/s$, $Q_{P2}=2.5l/s$, $Q_{P3}=1.25l/s$, $Q_{P4}=2.5l/s$, $Q_{P5}=0l/s$, $Q_{P6}=0l/s$, etc), on peut définir le sous-ensemble flou des puits "P" performant (le degré de performance étant d'autant plus grand, par exemple, que le débit pompé est grand) avec la notation suivante :

$$A = 1 / P1 + 0.5 / P2 + 0.25 / P3 + 0.5 / P4 + 0 / P5 + 0 / P6 + \dots$$

Les fonctions d'appartenance les plus usuelles sont :

- **Trapézoïdale** définie par l'équation (4.2):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si: } x \geq a - \alpha \text{ ou } x \geq b + \beta \\ \frac{x}{\alpha} + \left(1 - \frac{a}{\alpha}\right) & \text{Si: } a - \alpha < x < a \\ 1 & \text{Si: } a \leq x \leq b \\ -\frac{x}{\beta} + \left(1 + \frac{b}{\beta}\right) & \text{Si: } b < x < b + \beta \end{cases} \quad (4.2)$$

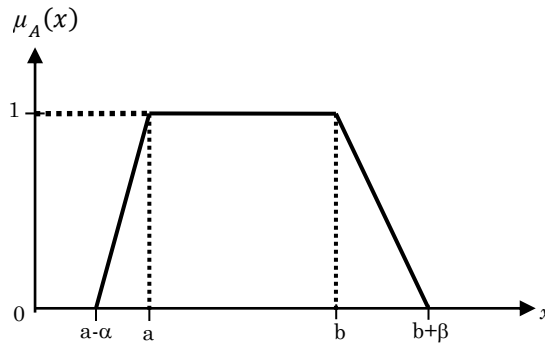


Figure 4. 2. Fonction d'appartenance trapézoïdale

- **Triangulaire** : elle constitue un cas particulier de la fonction trapézoïdale.

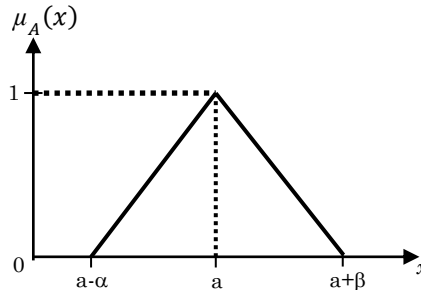


Figure 4. 3. Fonction d'appartenance triangulaire

- **Sigmoïde** : elle est définie par l'équation (4.3):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si: } x < a - \alpha \text{ ou } x > b + \beta \\ 1 & a < x < b \\ \frac{2(x - a + \alpha)^2}{\alpha^2} & \text{si: } a - \alpha < x < a - \alpha/2 \\ 1 + \frac{2(x - a)^2}{\alpha^2} & \text{si: } a - \alpha/2 < x < a \\ 1 - \frac{2(b - x)^2}{\beta^2} & \text{si: } b < x < b + \beta/2 \\ \frac{2(x - b + \beta)^2}{\beta^2} & \text{si: } a + \beta/2 < x < b \end{cases} \quad (4.3)$$

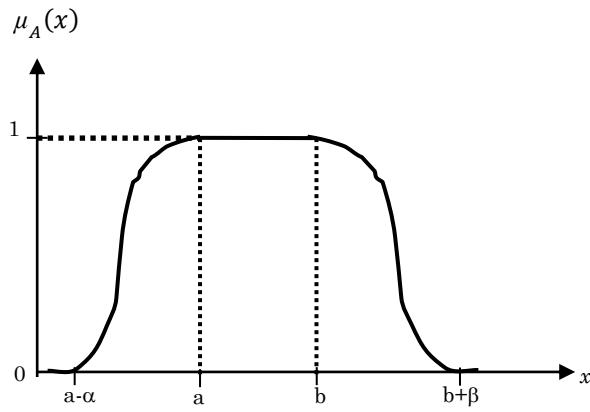


Figure 4. 4. Fonction d'appartenance sigmoïde

- **Gaussienne** : cette fonction d'appartenance est définie par l'équation (4.4):

$$\mu_A(x) = \exp(-(x-m)^2 / 2\sigma^2) \quad (4.4)$$

Où 'm' est la moyenne gaussienne et 'σ' sa variance.

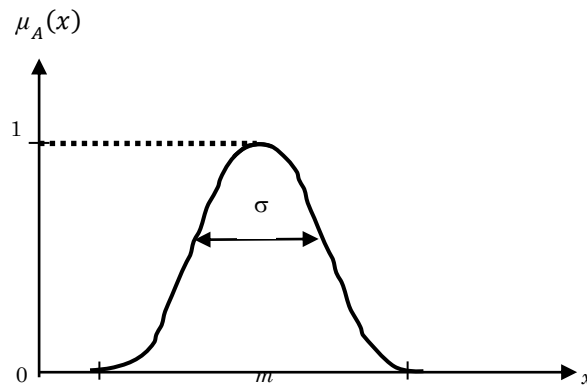


Figure 4. 5. Fonction d'appartenance gaussienne

- **Singleton** : elle est définie par l'équation (4.5) :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si: } x = x_0 \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (4.5)$$

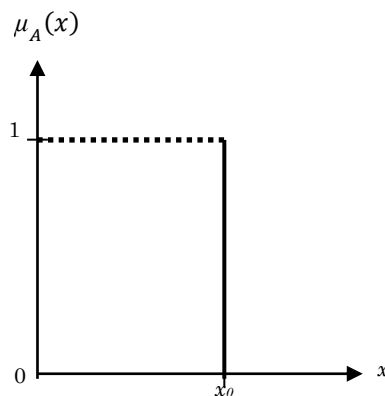


Figure 4. 6. Fonction d'appartenance singleton

4.3.2.3 Caractéristiques des sous-ensembles flous

Les caractéristiques d'un sous-ensemble flou A de X , les plus essentielles pour le décrire, sont celles qui montrent comment il diffère d'un sous-ensemble classique de X (voir figure 4.7). Elles se présentent comme suit :

- La **support** de A est la principale caractéristique d'un sous-ensemble flou A : c'est l'ensemble des éléments de X qui appartiennent, au moins un peu, à A ; c'est-à-dire la partie de X sur laquelle la fonction d'appartenance de A n'est pas nulle. Il est noté **supp(A)** avec:

$$\text{supp}(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) \neq 0 \} \quad (4.6)$$

- La **hauteur** de A , notée **h(A)**, est la seconde caractéristique d'un sous-ensemble flou A : c'est le plus fort degré d'appartenance avec lequel un élément de X appartient à A ; c'est-à-dire la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance suivante:

$$h(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x)) \quad (4.7)$$

Le sous-ensemble flou A de X est **normalisé** si sa hauteur $h(A)$ est égale à 1, c'est-à-dire qu'il existe au moins un élément de X appartenant de façon absolue (avec un degré 1) à A .

- Le **noyau** de A , noté **noy(A)** : est l'ensemble des éléments de X pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1 :

$$\text{noy}(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) = 1 \} \quad (4.8)$$

- La **cardinalité** du sous-ensemble flou A de X indique le degré global avec lequel les éléments de X appartiennent à A , elle est définie par la formule (4.9).

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad (4.9)$$

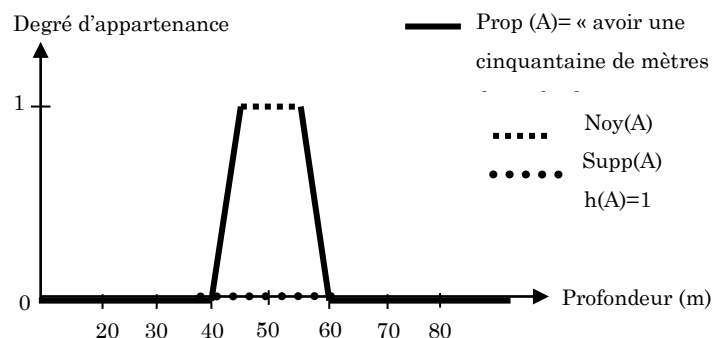


Figure 4. 7. Notions caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Si A est un sous-ensemble ordinaire de X , sa hauteur est égale à 1. Il est normalisé et identique à son support et à son noyau. Sa cardinalité est le nombre d'éléments qui le composent, selon la définition classique.

- **α -coupe** : Pour toute valeur α de l'intervalle $(0, 1)$, on appelle α -coupe d'un sous-ensemble flou A de X , le sous-ensemble A_α des éléments qui appartiennent à X pour lesquels la fonction d'appartenance est supérieure ou égale à α :

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (4.10)$$

Ce sous-ensemble est défini par la fonction caractéristique χ_{A_α} , avec : $\chi_{A_\alpha} = 1$ si et seulement si $\mu_A(x) \geq \alpha$.

Si nous choisissons $\alpha = 0$, alors A_α est l'univers du discours X . Si nous choisissons $\alpha = 1$, alors A_α est le noyau de A , $N(A)$.

Remarque : La définition d'un sous-ensemble de flou correspondant à une propriété donnée dépend du contexte de son emploi. Dans tous les systèmes de représentation des connaissances, la définition d'un sous-ensemble flou nécessite une sélection des interprétations possibles et la détermination de l'association entre le mot utilisé lors de la collecte des connaissances (par exemple, "une cinquantaine de mètres de profondeur") et les éléments de l'univers (ici les profondeurs de 0 à l'infini); c'est-à-dire définir le noyau et le support. De tels systèmes ont l'avantage de faciliter la communication entre plusieurs observateurs lorsque plusieurs interlocuteurs ne s'entendent pas sur la définition d'un sous-ensemble flou qui représente un consensus et agrège les différentes définitions proposées (Bouchon-Meunier B., 1995).

4.3.2.4 Opérations de base sur les sous-ensembles flous

Supposons que A et B sont deux sous-ensembles flous définis dans un univers du discours X par les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B . On peut définir des opérations ensemblistes telles que l'inclusion, l'intersection, l'union et le complément grâce à des opérations sur les fonctions d'appartenance.

- **Inclusion** : A est dit inclus dans B , propriété que l'on note $A \subseteq B$, si tout élément x de X qui appartient à A appartient aussi à B avec un degré au moins aussi grand :

$$\forall x \in X : \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (4.11)$$

- **Complément** : Le complément de A , que l'on note A_c , est le sous-ensemble flou de X constitué des éléments x lui appartenant d'autant plus qu'ils appartiennent peu à A :

$$\forall x \in X : \mu_{A_c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.12)$$

Exemple : reprenons l'exemple précédent. On considère les puits ayant «une cinquantaine de mètres de profondeur» et ceux «ayant plus de cinquante mètres de profondeur», comme le montre la figure 4.8.

Selon la définition de l'intersection de deux sous-ensembles flous, on peut caractériser le sous-ensemble flou correspondant aux puits « ayant une cinquantaine de mètres 'ET' plus de 50m de profondeur » (voir figure 4.9).

Selon la définition de l'union de deux sous-ensembles flous, on peut caractériser le sous-ensemble flou correspondant aux puits « ayant une cinquantaine de mètres 'OU' plus de 50m de profondeur » (voir figure 4.10).

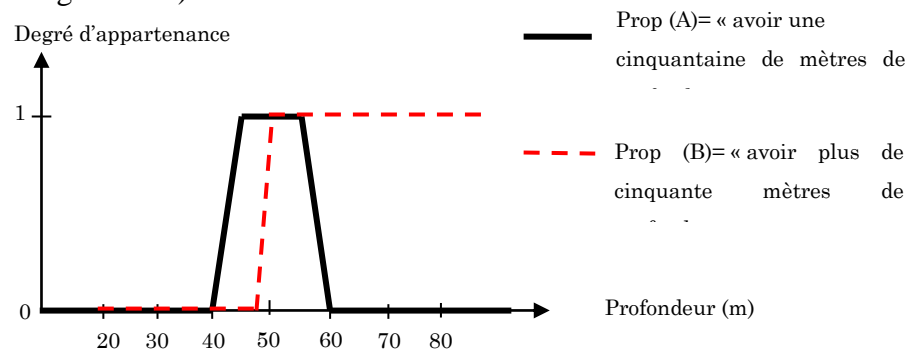


Figure 4. 8. Les deux sous-ensembles flous considérés

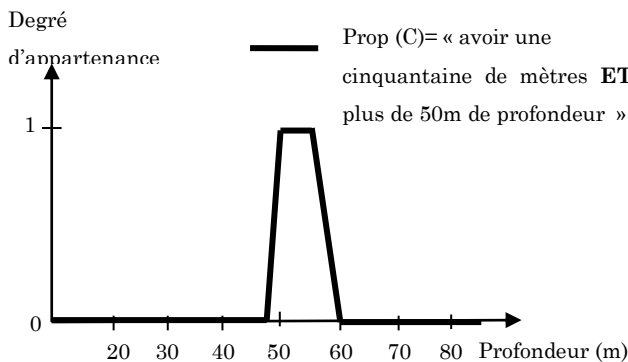


Figure 4. 9. Intersection de deux ensembles flous A et B

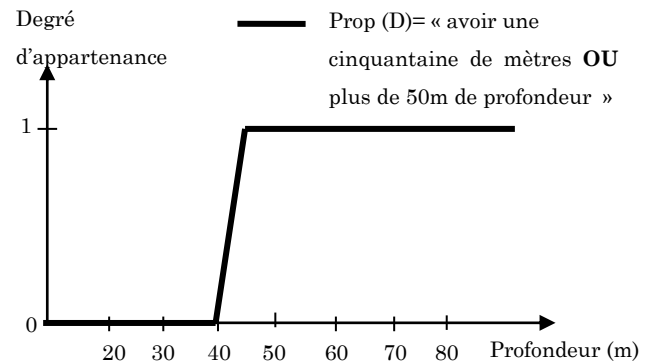


Figure 4. 10. Union de deux sous- ensembles flous A et B

Imaginons que l'on cherche des puits ayant une cinquantaine de mètres et plus de 50m de profondeur, d'après la figure 4.9 un puits de 57m ne conviendra qu'avec un degré d'appartenance égal à 0.5, alors qu'un puits de 54m conviendra tout à fait (avec un degré égal à 1).

Comme dans la théorie des ensembles classiques, les mêmes propriétés restent valables, telles que l'associativité, la commutativité, etc.

4.3.2.5 Variables linguistiques

La description d'une situation, d'un phénomène ou d'un processus particulier contient généralement des qualificatifs flous tels que :

- peu, beaucoup, énormément
- rarement, fréquemment, souvent
- froid, tiède, chaud
- petit, moyen, grand
- etc.

On modélise des connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur exacte est inconnue, (par exemple : «la vulnérabilité du site à la pollution est faible», « la distance entre A et B est entre 200 et 250 mètres » ou encore « le site se trouve à $1\text{km} \pm 200\text{m}$ »), par le biais d'une variable linguistique.

Une variable linguistique est un triplet (V, X, T_V) , dans lequel V est une variable définie sur un ensemble de référence X . L'ensemble $T_V = \{A_1, A_2, \dots\}$, fini ou infini, contient des sous-ensembles normalisés de X utilisables pour caractériser V (Bouchon Meunier, 1995).

Exemples :

Variables linguistique V_1

Considérons la "superficie" d'un terrain comme variable linguistique V_1 (figure 4.11) définie sur l'ensemble X des réels positifs R^+ . Plus la description de la variable est fine, plus le nombre d'éléments qui constituent T_V est grand.

$V_1 = \text{superficie}$, $X = R^+$, $T_V = \{\text{Minuscule, Petite, Moyenne, Grande, Immense}\}$.

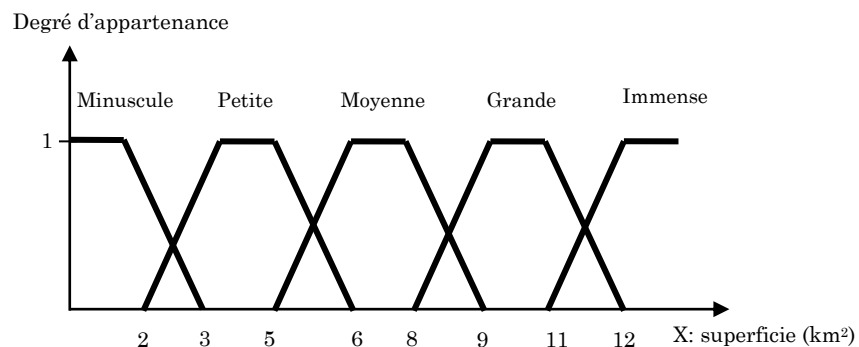


Figure 4. 11. Exemple de variable linguistique (V_1, X, T_V)

Variables linguistique V_2

Considérons la variable linguistique " **Vulnérabilité** " (vulnérabilité d'une nappe d'eaux souterraines à la pollution calculée selon la méthode DRASTIC par exemple), elle peut contenir les sous-ensembles flous, « faible », « moyenne », « élevé », « très élevé », (voir figure 4.12).

$V_2 = \text{vulnérabilité}$; $X = R^+$; $T_V = \{\text{faible, moyenne, élevée, très élevée}\}$.

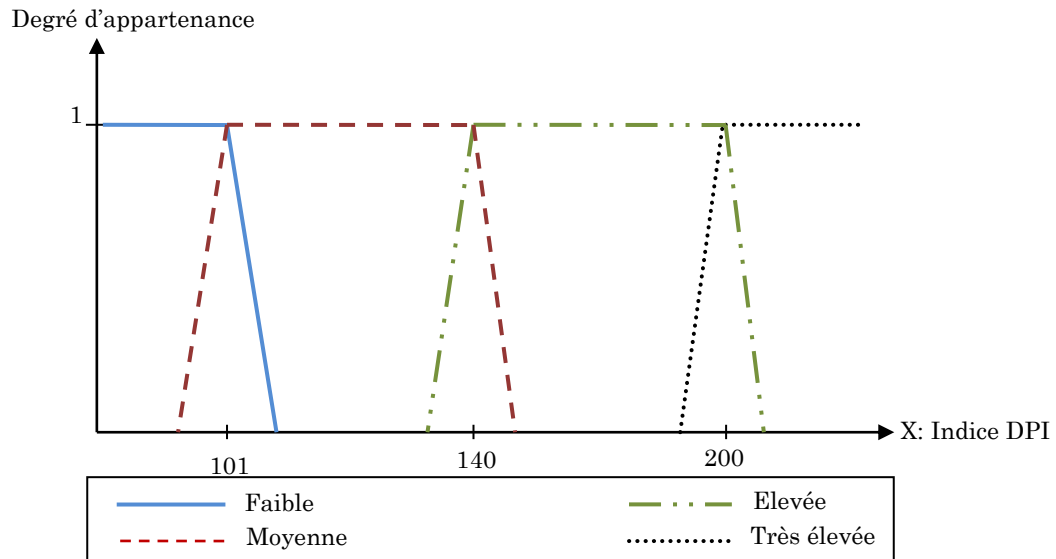


Figure 4. 12. Variable linguistique (V_2 , X , TV)

Avec: DPI est l'indice qui mesure le niveau de risque de contamination d'une unité hydrogéologique selon la méthode DRASTIC, (Se référer au paragraphe B.4.2 de l'annexe B).

4.4 Classement de nombres flous

Dans de nombreuses applications, le classement de nombres flous est un élément important dans le processus décisionnel.

4.4.1 Méthodes de classement de nombres flous

Il existe plusieurs méthodes pour le classement des nombres flous, telles que la maximisation des ensembles et la minimisation des ensembles, les points centroïdes, la réduction de la distance, etc. Plusieurs d'entre elles se trouvent aux références suivantes: Kaufmann et Gupta (1988), Paek et al. (1992), Baas et Kwakernaak (1997), Raj et Kumar (1999), Chu et Tsao (2002), Deep et al. (2007), Hajjari et Barkhordary (2007), Basirzadeh et Abbasi (2008), Paradina et Araghi (2008), Farhadinia (2010), Kumar et al. (2010), Allahyiranloo et al. (2011), Saneifard et Nahid (2013) et Singh (2015). Différentes méthodes sont résumées dans cette section, à savoir :

1. La méthode dite "*Classement des alternatives avec des poids flous en utilisant l'ensemble de maximisation et minimisation*" (Raj et Kumar, 1999). Cette méthode a pour objectif, le classement des alternatives (qualitatives et quantitatives) dans un environnement multicritère en se basant sur l'opinion d'experts (structure de préférence) qui utilisent des nombres flous et des variables linguistiques dans le modèle d'évaluation des alternatives. Les poids flous des alternatives sont donc calculés en utilisant l'arithmétique floue standard. Le concept d'ensemble de maximisation et de minimisation est introduit pour décider de l'utilité totale ou de la valeur d'ordre de chacune des alternatives.

2. La méthode intitulée: " *Classement des alternatives dans un environnement flou en utilisant la valeur globale*" (Deep K. et al. 2007). Dans cette méthode, l'approche de la valeur intégrale avec l'indice d'optimisme du décideur a été utilisée, pour classer les différentes alternatives sur la base des poids flous agrégées. Cette méthode est indépendante du type et de la normalité de la fonction d'appartenance utilisée. En outre, un indice d'optimisme a été utilisé pour tenir compte de l'attitude optimiste du décideur.
3. La méthode de "*Classement des nombres flous par longueur de signe*" (Hajjari et Barkhordary, 2007). C'est une méthode approximative de classement des nombres flous basée sur le point centroïde de la surface délimitée par le graphique de la fonction d'appartenance du nombre flou.
4. La méthode de "*Classement des nombres flous basée sur les α -coupes*" (Basir zadeh et Abbasi, 2008). Cette méthode peut être utilisée pour tous types de nombres flous, que ce soit normal, négative,...
5. La méthode de "*Classement des nombres flous par la méthode de distance*" (Parandina et Fariborzi A, 2008). Dans cette méthode, le classement des nombres flous est défini par le calcul de la distance relative du centre de gravité de tous les points centroïdes des nombres flous.
6. La méthode de "*Classement des nombres flous basés sur l'ordre lexicographique*" (Farhadinia, 2009). Cette méthode développe un modèle pour le classement de nombres flous, basé sur l'ordre lexicographique qui fournit aux décideurs un algorithme simple et efficace pour générer une commande fondée à la préséance.
7. En 2010 (Kumar et al, 2010) ont proposé une méthode dite: "*Classement des nombres flous exponentiels généralisés en utilisant l'approche de la valeur intégrale*". Cette méthode utilise l'approche de la valeur globale. Une formule de classement est introduite, pour comparer les nombres flous exponentiels. Elle dépend de la hauteur du nombre flou.
8. La méthode de "*Classement des nombres flous basée sur des solutions parfaites positives et négatives*" (Saneifard et Nahid, 2013). Cette méthode de classement est basée sur la distance entre la solution idéale positive et la solution idéale négative. Le principal avantage de l'approche proposée est qu'elle fournit l'ordre correct des nombres flous généralisés et normaux et qu'elle est très simple et facile à appliquer dans les problèmes de la vie réelle.

9. La méthode de "*Classement des nombres flous généralisés*" (Singh, 2015). Dans cette méthode on considère les cinq critères, tel que le rang, le mode, la divergence, la propagation gauche ou droite et la hauteur des ensembles flous, pour donner un ordre aux nombres flous généralisés.
10. La méthode "*de classement de nombres flous par l'ensemble maximisant et l'ensemble minimisant avec des poids flous*" (Chang et Chen, 1994). Cette méthode est choisie pour l'application développée dans le chapitre 8 de cette thèse. Plus de détails, concernant cette méthode, sont présentés dans la section suivante.

4.4.2 Classement des nombres flous par l'ensemble *maximisant* et l'ensemble *minimisant*

La méthode de classement de nombres flous, par l'ensemble *maximisant* et l'ensemble *minimisant*, utilisée dans le cadre de cette étude, est employée pour le classement des alternatives dans un environnement multicritère en utilisant des variables linguistiques (Chang et Chen, 1994; Chang et al., 2008). Les alternatives et les poids des critères sont exprimés sous forme de nombres flous triangulaires. Cette méthode est choisie pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre.

Considérons le problème de classement de 'm' alternatives A_i (avec: $i=1, 2, \dots, m$).

Soit $F_i = (Y_i; Q_i; Z_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) les indices de pertinence flous appropriés aux alternatives, exprimés par rapport aux 'k' critères par 'n' experts.

L'ensemble maximisant des nombres flous F_i est défini comme suit :

$M1 = \{(x, f_{m1}(x)) \mid x \in \mathbb{R}\}$, avec:

$$f_{m1}(x) \left\{ \begin{array}{ll} (x - x_1)/(x_2 - x_1), & x_1 < x \leq x_2 \\ 0 & \text{Si non} \end{array} \right\} \quad (4.13)$$

Et l'ensemble minimisant des nombres F_i est défini par :

$M2 = \{(x, f_{m2}(x)) \mid x \in \mathbb{R}\}$, avec :

$$f_{m2}(x) \left\{ \begin{array}{ll} (x - x_2)/(x_1 - x_2), & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & \text{Si non} \end{array} \right\} \quad (4.14)$$

Où: $x_1 = \inf S$, $x_2 = \sup S$, $S = \bigcup_{i=1, m} F_i$, $F_i = \{x \mid f_{F_i}(x) > 0\}$, pour $i = 1, 2, \dots, m$.

Les fonctions d'utilité optimiste $U_{m1}(F_i)$ et d'utilité pessimiste $U_{m2}(F_i)$ pour chaque indice approprié F_i sont définies comme suit :

$$U_{m1}(F_i) = \sup(f_{F_i}(x), \wedge f_{m1}(x)) \text{ et } U_{m2}(F_i) = 1 - \sup(f_{F_i}(x), \wedge f_{m2}(x)) \quad (4.15)$$

Pour $i = 1, 2, \dots, m$. Le symbole \wedge signifie min.

La valeur du classement $U_T(F_i)$ des indices flous appropriés est définie comme suit :

$$U_T(F_i) = \alpha U_M(F_M) + (1 - \alpha)U_G(F_i), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4.16)$$

Avec: α est un indice de position attribuée.

Finalement, la valeur $U(F_i)$ donnant le classement des valeurs F_i , développée par (Chang et Chen, 1994; Chang et al., 2008), peut être approximativement exprimée par :

$$U(F_i) \cong R[(Z_i - X_1)/(X_2 - X_1 - Q_i + Z_i)] + (1 - R)[1 - \frac{X_2 - Y_i}{X_2 - X_1 + Q_i - Y_i}]. \quad (4.17)$$

Avec: R est exprimé avec la formule suivante :

$$R = \left\{ \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^n \frac{a_{tj} - c_{tj}}{b_{tj} - c_{tj}} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^n \frac{o_{itj} - q_{itj}}{p_{itj} - q_{itj}} \right\} / (kn + mkn) \quad (4.18)$$

Où, les valeurs $(q_{itj}, o_{itj}, p_{itj}, c_{tj}, a_{tj}, b_{tj})$, sont relatives aux évaluations floues des alternatives (S_{itj}) et les poids des différents critères (W_{tj}) . Les $S_{itj} = (q_{itj}, o_{itj}, p_{itj})$ et $W_{tj} = (c_{tj}, a_{tj}, b_{tj})$ sont agrégés selon la méthode, développer par (Chang et Chen, 1994), qui est présentées dans la section suivante(voir les équations 4.19, 4.20, 4.21, 4.22).

4.4.3 Aggrégation des évaluations floues et calcul de l'indice de pertinence flou F_i

Selon la méthode développée par (Chang et Chen, 1994), l'agrégation des évaluations des experts pour m alternatives A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) est considérée comme suit:

Soient les évaluations (S_{itj}) d'alternatives A_i , de " n " experts E_j ($j = 1, 2, \dots, n$) par rapport à " k " critère C_t ($t = 1, 2, \dots, k$). W_{tj} ($t = 1, 2, \dots, k$) sont les poids flous correspondant à chaque critère C_t exprimé par les expert E_j . Les évaluations S_{itj} et W_{tj} se présentent sous forme de nombres flous triangulaires.

Cette méthode utilise des opérateurs flous moyens pour agréger les évaluations des experts. Soient \oplus et \otimes respectivement, les opérateurs d'addition floue et de multiplication floue. L'agrégation des différentes évaluations est donnée par les équations 4.19 et 4.20

$$S_{it} = (S_{it1} \oplus S_{it2} \oplus \dots \oplus S_{itn}) \otimes (1/n), \quad (4.19)$$

$$W_t = (W_{t1} \oplus W_{t2} \oplus \dots \oplus W_{tn}) \otimes (1/n), \quad (4.20)$$

Avec: S_{it} correspond à l'évaluation floue moyenne de chaque alternative A_i par rapport à chaque critère C_t , et W_t est le poids flou moyen de chaque critère C_t .

L'indice de pertinence flou F_i des alternatives est obtenu par l'agrégation des S_{it} et W_t en utilisant les équations 4.21 et 4.22.

$$F_i = [(S_{i1} \otimes W_1) \oplus (S_{i2} \otimes W_2) \oplus \dots \oplus (S_{ik} \otimes W_k)] \otimes (1/k) \quad (4.21)$$

Soient: $S_{itj} = (q_{itj}, o_{itj}, p_{itj})$ et $W_{tj} = (c_{tj}, a_{tj}, b_{tj})$ des nombres flous triangulaires.

F_i est donc, exprimé sous forme de nombre flou triangulaire:

$$F_i = (Y_i, Q_i, Z_i), \quad (4.22)$$

Avec:

$$Y_i = \sum_{t=1}^k (q_{it}c_t/k); \quad Q_i = \sum_{t=1}^k (o_{it}a_t/k); \quad Z_i = \sum_{t=1}^k (p_{it}b_t/k)$$

$$q_{it} = \sum_{j=1}^n (q_{itj}/n); \quad o_{it} = \sum_{j=1}^n (o_{itj}/n); \quad p_{it} = \sum_{j=1}^n (p_{itj}/n),$$

$$c_t = \sum_{j=1}^n (c_{tj}/n); \quad a_t = \sum_{j=1}^n (a_{tj}/n); \quad b_t = \sum_{j=1}^n (p_{tj}/n),$$

4.5 Opérateurs flous pour l'agrégation de sous-ensembles flous

Des informations imprécises et incomplètes, représentées en utilisant la logique floue, peuvent être manipulées et traitées par des opérateurs de sous-ensembles flous. Certains de ces opérateurs, les plus fondamentaux et qui sont le plus souvent appliqués au traitement de l'information, sont les suivants (Zimmermann, 1985, An et al. 1991):

- *Opérateur MIN:*

La fonction d'appartenance $\mu_C(x)$ de l'intersection de deux sous-ensembles flous A et B,

$C = A \cap B$, est définie par:

$$\mu_C(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.23)$$

Cet opérateur a le même sens que l'opérateur logique ET (AND).

- *Opérateur MAX:*

La fonction d'appartenance $\mu_C(x)$ de l'union de deux sous-ensembles flous A et B

$C = A \cup B$, est définie par:

$$\mu_C(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.24)$$

Cet opérateur a le même sens que l'opérateur logique OU (OR).

- *Opérateur de SOMME-ALGEBRIQUE*

La somme algébrique $C = A + B$, de deux sous-ensembles flous A et B, est définie comme suit:

$$C = \{x, \mu_{A+B}(x) / x \in X\}, \text{ avec: } \mu_{A+B}(x) = 1 - [(1 - \mu_A(x)) * (1 - \mu_B(x))] \quad (4.25)$$

L'opérateur 'MIN' ne permet pas de compensation entre un niveau faible et un niveau élevé de représentation des nombres flous. En revanche, la compensation complète est assurée par l'opérateur 'MAX' (Zimmermann, 1985). La somme algébrique peut également être interprétée comme l'opérateur logique "OU", mais pas seulement, elle présume une compensation totale et elle est également croissante.

- Opérateur **Produit** ' \prod '

Le produit C de deux sous-ensembles flous A et B, est déterminé par la fonction d'appartenance $\mu_C(x)$ suivante:

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (4.26)$$

- Opérateur γ

L'opérateur γ est défini par Zimmermann et Zysno (1980) comme une combinaison de produit algébrique et somme algébrique. La fonction d'appartenance $\mu_C(x)$ de l'agrégation γ des sous-ensembles flous A_1, A_2, \dots, A_n , est formulée comme suit:

$$\mu_C(x) = [\prod_{i=1}^n \mu_i(x)]^{(1-\gamma)} * [1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i(x))]^\gamma \quad (4.27)$$

Avec: $x \in X, 0 \leq \gamma \leq 1$.

4.6 Conclusion

La logique floue offre une approche pragmatique pour traiter des situations du monde réel qui sont souvent caractérisées par des imperfections dans les données et les connaissances. Elle offre une flexibilité importante dans la modélisation de la connaissance et de l'expertise humaine. Plutôt que de se limiter à des valeurs binaires (vrai/faux), elle permet de travailler avec des degrés de certitude.

Chapitre 5
Interpolation spatiale &
Krigage flou

5.1 Introduction

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation d'un ensemble de données ponctuelles connues dans des sites, pour estimer des données inconnues dans d'autres sites, et/ou générer des données de surface.

Généralement, l'interpolation spatiale est effectuée avec un système d'information géographique (SIG). Un SIG fournit des outils d'analyse spatiale permettant de calculer des statistiques d'entités et d'effectuer des opérations de géotraitement et d'interpolation de données.

L'interpolation spatiale s'applique à de nombreux domaines où la connaissance de la distribution spatiale de phénomènes est importante : météorologie, altimétrie, géodésie, géologie, etc.

5.2 Caractéristiques des méthodes d'interpolation spatiale

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation spatiale. Elles peuvent être divisées en deux principales catégories : les méthodes déterministes et les méthodes géostatistiques (Bossier Pierre., 2011).

Les méthodes déterministes ne considèrent pas la structure spatiale des données. Elles utilisent seulement des équations mathématiques prédéfinies pour prédire des valeurs à des positions non échantillonnées, en pondérant les données des échantillons connus.

Au contraire, les approches géostatistiques visent à ajuster un modèle spatial aux données (en prenant en considération la structure spatiale des données autour de l'emplacement de prédiction). Cela permet d'estimer des valeurs interpolées à des emplacements non échantillonnés (comme les méthodes déterministes) et de fournir aux utilisateurs une estimation de la précision de cette interpolation.

5.2.1 Méthodes déterministes

Les méthodes d'interpolation déterministes peuvent être divisées en deux groupes: global et local. Les méthodes globales font l'interpolation des données en utilisant l'ensemble de données disponibles. Les méthodes locales calculent l'interpolation à partir des points mesurés locaux, qui sont des zones spatiales plus petites incluses dans une zone d'étude plus étendue.

5.2.1.1 Méthodes déterministes globales

1. Polygone de Thiessen

Cette méthode consiste à créer des polygones de Thiessen (appelés aussi, polygone de Voronoi ou cellules de Dirichlet) à partir d'un jeu de points d'échantillonnage. Chaque polygone de Thiessen définit une zone d'influence autour de son point d'échantillonnage, de telle sorte que

n'importe quel emplacement à l'intérieur du polygone est plus proche de ce point que de tout autre point d'échantillonnage (figure 5.1).

La méthode du polygone de Thiessen affecte à chaque point d'échantillonnage un facteur de pondération en fonction de la surface de chaque polygone.

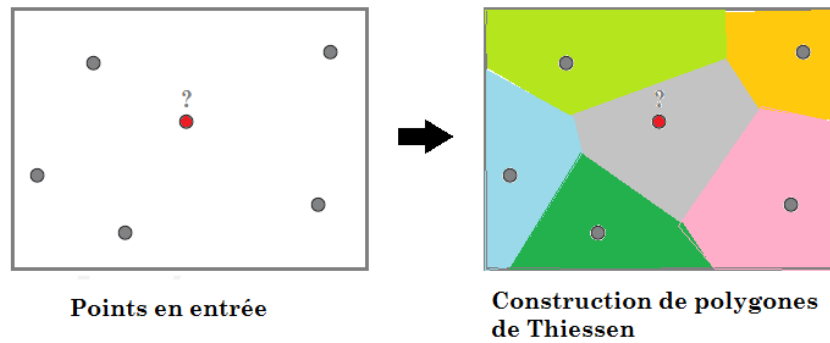


Figure 5. 1. Exemple de polygones de Thiessen.

2. Méthode de cellules

La méthode des cellules consiste à diviser la zone d'étude en cellules rectangulaires de même taille, contenant chacune un certain nombre de sites d'observations. Lors de l'estimation globale, la pondération des d'observations est effectuée à l'aide du nombre de sites contenus dans chaque cellule. Dans un premier temps, la moyenne des sites d'observations contenus dans chaque cellule est calculée. Ensuite, la moyenne des moyennes de toutes les cellules, sans pondération, est calculée (figure 5.2).

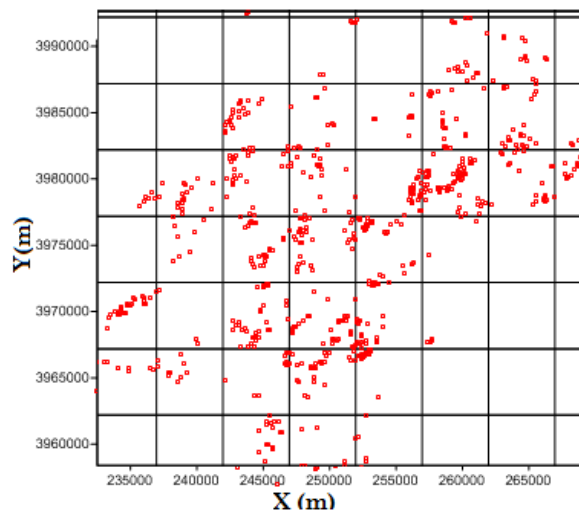


Figure 5. 2. Exemple de découpage en cellules.

5.2.1.2 Méthodes déterministes locales

Les méthodes déterministes locales sont basées sur les combinaisons linéaires des observations en tenant compte de leur disposition les unes par rapport aux autres mais aussi de la distance entre le point à estimer et les autres points.

1. Polygones de Thiessen

L'interpolation déterministe locale par la méthode de Thiessen consiste à affecter, à l'ensemble des points d'un polygone donné, la valeur de la variable correspondante (on parle aussi de plus proche voisin) (Bossier Pierre., 2011).

2. Triangulation

La méthode d'interpolation par triangulation consiste à diviser la zone d'étude en triangles disjoints dont les sommets sont les sites échantillonnés. Le calcul du point à interpoler se fait à partir des valeurs relatives aux sommets du triangle auquel il appartient. Il existe plusieurs méthodes de triangulation, tel que la triangulation de Delaunay, présentée dans la figure 5.3.

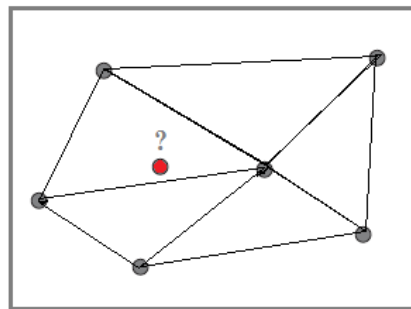


Figure 5. 3. Triangulation de Delaunay.

3. Méthodes barycentriques

Dans les méthodes d'interpolation barycentriques, on n'est pas limité au voisinage direct du point à estimer, on prend en considération un nombre plus important de données. Des poids plus importants sont donnés aux sites les plus proches de l'emplacement d'interpolation, et des poids moindres sont attribués aux sites les plus éloignés. La méthode barycentrique la plus utilisée est la pondération par inverse de distance IDW.

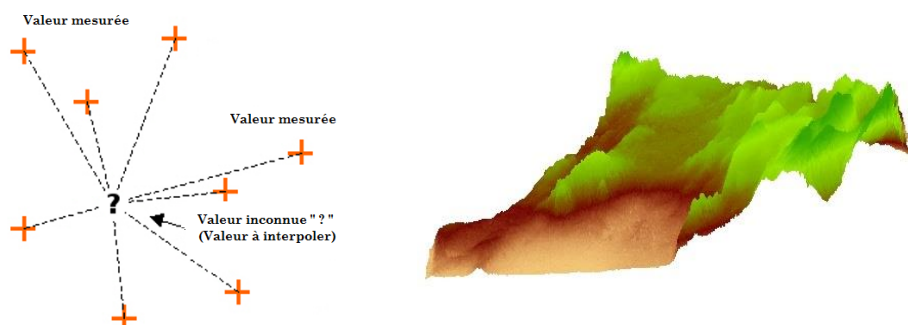


Figure 5. 4. Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW)

4. Surfaces de tendances

Cette méthode d'interpolation consiste à ajuster par moindre carré une surface lisse définie par un polynôme aux données observées. La surface de tendance évolue graduellement et capture des structures à échelle grossière dans les données.

5. Splines

Les splines sont également utilisées dans les problèmes de lissage de données d'observations. C'est une famille de fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement. Les méthodes d'interpolation des splines sont souvent préférées à celles de tendances.

5.2.2 Méthodes géostatistiques

La géostatistique peut être considérée comme un ensemble de méthodes mathématiques qui permet, à partir de données géoréférencées, de comprendre les phénomènes et de les représenter spatialement. L'analyse des données, à partir de laquelle sont modélisés les phénomènes, permet leur interpolation et fournit, également, un niveau d'incertitude de l'interpolation au niveau local.

Les approches géostatistiques incluent le krigeage et ses variantes. La géostatistique traite les données spatiales à travers une analyse de semi-variogramme. Ce dernier est une caractérisation de la corrélation spatiale des données.

5.2.2.1 Semi-variogramme experimental

L'analyse du semi-variogramme comprend le semi-variogramme expérimental calculé à partir des données et le modèle de semi-variogramme ajusté aux données ("semi-variogramme" est une terminologie dépassée depuis longtemps, d'où l'utilisation du terme variogramme dans la suite du document).

Théoriquement, pour calculer le variogramme experimental (voir figure 5.5), la formule suivante est couramment utilisée :

où $\gamma(h)$ est la valeur du variogramme pour la distance de décalage (h), $N(h)$ est le nombre total de paires de variables séparées par une distance de décalage (h), et $Z(x)$ est la valeur de la variable.

Au lieu de dessiner chaque paire individuellement, les paires sont rassemblées en groupes de décalages. La semi-variance moyenne, pour toutes les paires de points se trouvant à plus de $h/2$ et à moins de $h+(h/2)$ les unes des autres, est calculée.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (5.1)$$

Le variogramme expérimental est tracé sous la forme d'un graphique à deux dimensions. Il affiche les valeurs de variogramme moyennes $\gamma(h)$ sur l'axe des y et la distance h (ou décalage ou lag en anglais) sur l'axe des x.

L'étude de la structure des données par les variogrammes consiste à examiner l'évolution de la variation quadratique moyenne de l'accroissement de la fonction $Z(x)$ en fonction de la distance de décalage h d'amplitudes croissante. Aux points d'échantillonnage avec des distances proches, la différence de valeurs entre les points a tendance à être faible. En d'autres termes, la semi-variance est faible.

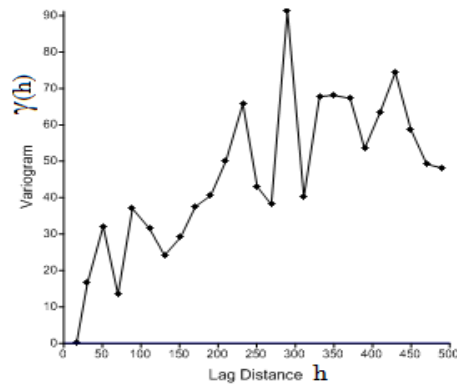


Figure 5. 5. Exemple d'un variogramme expérimental (empirique)

5.2.2.2 Modèles de variogramme théorique

Le modèle de variogramme est choisi parmi un ensemble de fonctions mathématiques qui décrivent des relations spatiales. Le modèle approprié est choisi en faisant correspondre la forme de la courbe du variogramme expérimental à la forme de la courbe de la fonction mathématique. Les composantes d'un variogramme théorique sont définies par un palier (seuil) " s ", une portée " r " et un effet de pépite η (voir figure 5.6).

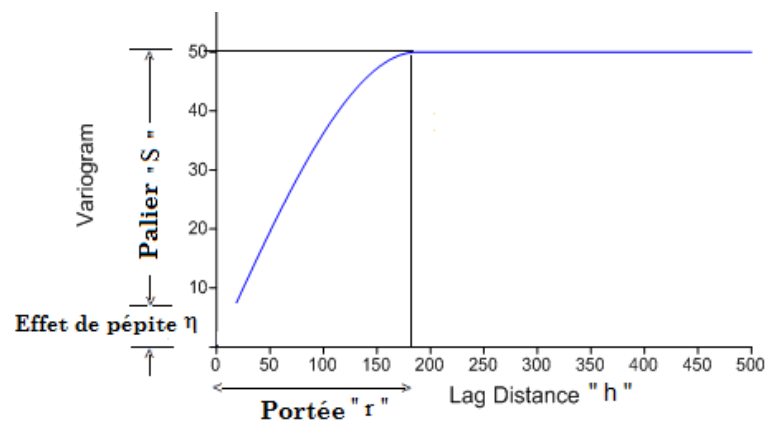


Figure 5. 6. Exemple d'un variogramme théorique.

Pour prendre en considération les caractéristiques du comportement des variogrammes expérimentaux, plusieurs modèles théoriques ont été élaborés. On distingue les modèles sans paliers et les modèles avec palier. Les modèles théoriques les plus fréquemment utilisés sont (Floch J-M., 2018) :

Modèle sphérique:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ \eta + s \left(\frac{3h}{2r} - \frac{h^3}{2r^3} \right) & \text{si } 0 < h \leq r \\ \eta + s & \text{si } h > r \end{cases} \quad (5.2)$$

Modèle exponentiel:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ \eta + s \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{r}\right) \right) & \text{si } h > 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Modèle gaussien:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ \eta + s \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{r}\right)^2 \right) & \text{si } h > 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

5.3 Interpolation par krigeage

Les méthodes d'interpolation communément utilisées dans le domaine des sciences de la terre sont les méthodes géostatistiques de Krigeage. Ces méthodes, qui font partie des méthodes de la géostatistique linéaire, ont l'avantage d'examiner et d'utiliser la cohérence spatiale entre les données et de prendre en compte des variables auxiliaires. Le Krigeage est donc, une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui permet la prédiction (interpolation) de valeurs inconnues caractérisant un phénomène naturel, par une combinaison linéaire qui soit sans biais et avec un minimum de variance, et ceci, en utilisant les valeurs connues du phénomène en des emplacements voisins.

En général, la structure du krigeage suppose que l'interpolation à n'importe quel emplacement est une combinaison linéaire de n observations collectées (Loquin et al; 2012). L'estimateur serait une combinaison linéaire des données disponibles dont les poids sont les inconnues du problème d'estimation locale. Ils sont définis en se basant sur le formalisme probabiliste et ensuite affectés aux données.

L'équation générale de la méthode de krigeage a la forme suivante :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_0^i Z(x_i) \quad (5.5)$$

où λ_0^i est le poids associé à chaque point de données i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), $Z(x_i)$ est la valeur observée au point x_i , $Z^*(x_0)$ est la valeur interpolée au point x_0 , et n est le nombre d'échantillon des points. Avec :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_0^i = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.6)$$

Les valeurs des poids λ_0^i , sont estimées en minimisant la variance de krigeage (σ^2) donnée par:

$$\sigma^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (Z^*(x) - Z(x))^2 \quad (5.7)$$

Pour la comparaison entre les différents modèles de variogramme, l'erreur moyenne quadratique (EMQ) est calculée avec la formule suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2} \quad (5.8)$$

EMQ est utilisé pour choisir le meilleur modèle en comparant sa valeur, et la plus petite valeur de l'EMQ indique le modèle le plus adapté aux données.

5.4 Méthodes de krigeage

Le krigeage effectue le calcul de la variance d'estimation minimale pour tout estimateur linéaire. Dans le cadre stationnaire, il existe deux formes particulières de krigeage, selon que l'on connaît ou non la moyenne du processus: le krigeage simple et le krigeage ordinaire.

5.4.1 Krigeage simple

Parfois on connaît la moyenne du processus à estimer ou bien on a une estimation fiable. On peut alors former un estimateur sans biais sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1.

5.4.2 Krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire est la méthode la plus générale et la plus couramment utilisée. Elle suppose que la moyenne constante est inconnue. Il s'agit d'une hypothèse valable a priori, sauf si des raisons scientifiques s'y opposent.

5.4.3 Krigeage universel

Le krigeage universel suppose qu'il existe une tendance dominante dans les données et qu'elle peut être modélisée par une fonction déterministe (polynôme). Un polynôme est soustrait des points de mesure initiaux et l'autocorrélation est modélisée à partir d'erreurs aléatoires. À la fin de l'analyse, le modèle est ajusté des erreurs aléatoires avant l'interpolation.

5.5 krigeage flou

Selon Loquin et al; (2010), le krigeage flou est un cas particulier du krigeage qui tient compte de l'incertitude. Dans la littérature deux principales attitudes existent: le krigeage flou de Diamond (Diamond, P; 1989) et celle de Bardossy (Bardossy et al, 1990).

La méthode présentée par Diamond (Diamond, P; 1989) se concentre sur le krigeage avec des nombres flous comme valeurs d'entrée et un variogramme net (exact).

La méthode décrite par (Bardossy et al, 1990; 1988) gère à la fois les données floues et le variogramme flou.

5.5.1 Modélisation de l'incertitude dans le krigeage flou

Les modèles d'interpolation par krigeage flou sont généralement considérés si les données et/ou les paramètres du modèle sont vagues, imprécis ou mal connus (Ishibuchi, H., Nii, M, (2001); Caha et al, (2015)). De telles valeurs incertaines peuvent être modélisées par des nombres flous triangulaires (Caha et al, (2015)). Les nombres flous triangulaires sont définis comme des triplets $[a-, a_m, a+]$ (représentant la valeur minimale, modale et maximale). Une telle définition d'un nombre flou $A[a-, a_m, a+]$ est à la fois facile et compréhensible pour l'utilisateur ainsi que moins exigeante dans le processus de calcul que l'utilisation d'autres types de nombres flous (Ishibuchi, H., Nii, M, (2001); Caha et al, (2015))

L'interpolation par krigeage flou est généralement effectuée afin d'obtenir premièrement: la valeur modale comme résultat le plus probable (le résultat le plus probable qui équivaut également au résultat dans le cas d'une interpolation précise) et deuxièmement: les valeurs limites liées aux incertitudes des données ou/et des paramètres.

5.5.2 Variogramme flou

D'après Bardossy et al, 1990, un variogramme flou est le résultat d'une situation dans laquelle il est difficile de sélectionner le modèle et les paramètres d'un variogramme théorique basé sur un variogramme empirique existant. En effet, le type de variogramme théorique et en particulier ses paramètres est un processus partiellement subjectif qui dépend des connaissances et de l'expérience de l'utilisateur (Bardossy et al, 1990); (Loquin, K. et Dubois, D., 2010).

La sélection de paramètres légèrement différents du variogramme peut entraîner des interpolations distinctes, car différentes tendances spatiales peuvent être identifiées dans l'ensemble de données (Loquin, K. et Dubois, D., 2010).

L'interpolation par krigeage, en présence d'un variogramme flou, prend en considération l'incertitude qui entache les paramètres du variogramme. L'interpolation est basée sur une technique de calcul souple et les paramètres du variogramme flou sont modélisés sous forme de

nombres flous triangulaires. L'incertitude sur les valeurs des paramètres est propagée à travers le calcul de la surface interpolée.

Pour le variogramme flou, trois valeurs sont intéressantes : les valeurs minimales, modales et maximales des nombres flous triangulaires (figure 5.7). La valeur modale de l'interpolation floue peut être calculée comme une interpolation avec des données précises en utilisant les valeurs modales des paramètres du variogramme flou. Les valeurs minimales et maximales de l'interpolation sont calculées en utilisant le principe d'extension des nombres flous.

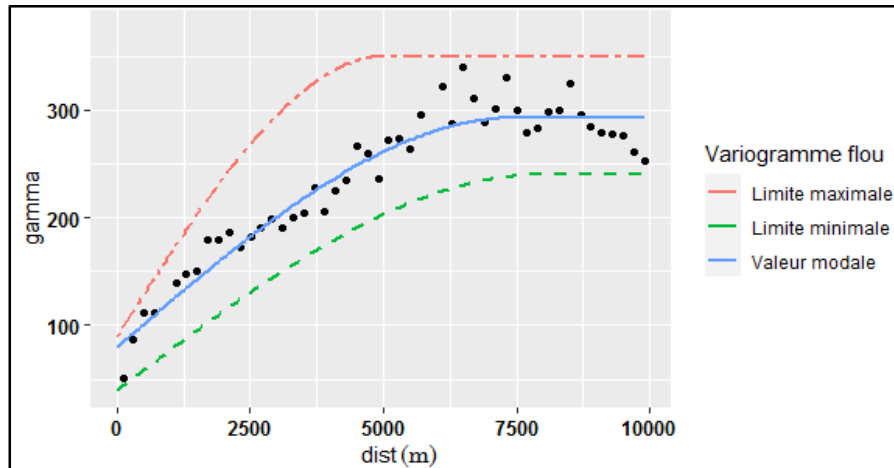


Figure 5. 7. Variogramme flou estimé (valeur minimale, modale et maximale) basé sur un variogramme empirique (points noirs).

5.5.3 Calcul des limites \underline{z}_0 (valeur minimale) et \bar{z}_0 (valeurs maximales) de l'interpolation floue

Dans la méthode du krigeage, la valeur estimée de la variable $z^*(x_0)$ à l'emplacement x_0 est calculée selon l'équation 5.5. D'après cette définition, le variogramme peut être perçu comme une fonction avec p paramètres $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_p\}$. L'estimation de krigeage peut être réécrite sous la forme suivante (Loquin et al; 2012):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) z(x_i) = f_0(\mathbf{a}, \mathbf{z}) \quad (5.9)$$

La fonction f_0 possède $(n + p)$ variables (n : nombre des observations \mathbf{z} ; p : nombre des paramètres \mathbf{a} du variogramme théorique).

Dans le cas du krigeage flou, ' \mathbf{a} ' et ' \mathbf{z} ' sont les nombres flous \tilde{a} et \tilde{z} , la fonction f_0 peut être calculée en utilisant le principe d'extension des nombres flous pour obtenir une interpolation floue $\tilde{z}^*(x_0)$ (Bardossy et al, 1990; Loquin et al; 2012).

Pour le calcul des limites des interpolations $\tilde{z}^*(x_0)$, les nombres flous d'entrée sont divisés en α -coupes, puis pour à chaque α -coupe le calcul est effectué et une α -coupe résultante est obtenue. Le problème du principe d'extension se résume à une séquence de problèmes d'optimisation

globale double (minimisation et maximisation) permettant de calculer les limites min et max de l'interpolation avec les équations 5.10 et 5.11 (Caha, j et al; 2015) :

$$\begin{cases} \underline{z}^0 = \min_{(a,z) \in \bar{a} \times \bar{z}} f_0(a, z) & (5.10) \\ \bar{z}^0 = \max_{(a,z) \in \bar{a} \times \bar{z}} f_0(a, z) & (5.11) \end{cases}$$

où \underline{z}^0 et \bar{z}^0 sont les limites d'intervalle de l'interpolation et $\bar{a} \times \bar{z}$ est un produit cartésien des domaines \bar{a} et \bar{z} pour la α -coupe spécifique.

Puisque nous nous intéressons à une variante du krigeage flou avec uniquement des paramètres du variogramme représentés par des nombres flous (\tilde{a}), le problème est relativement plus simple dans ce cas, car z sont des nombres précis et les équations 5.10 et 5.11 sont simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} \underline{z}^0 = \min_{(a,z) \in \bar{a}} f_0(a, z) & (5.12) \\ \bar{z}^0 = \max_{(a,z) \in \bar{a}} f_0(a, z) & (5.13) \end{cases}$$

Pour calculer les deux équations (5.12) et (5.13), il serait nécessaire d'explorer le domaine des paramètres \bar{a} et de calculer le krigeage pour chaque combinaison de \bar{a} pour obtenir les limites de l'interpolation \underline{z}^0 et \bar{z}^0 .

5.6 Conclusion

L'interpolation spatiale est un processus utilisé pour estimer des valeurs inconnues d'une variable sur un espace continu en fonction des valeurs mesurées ou observées en des points discrets. L'objectif principal de l'interpolation spatiale est de créer des surfaces continues qui représentent au mieux la variation spatiale de la variable d'intérêt.

Le choix de la méthode d'interpolation dépend souvent de la nature des données, de la distribution spatiale, et des caractéristiques du phénomène étudié.

Le krigeage est souvent utilisé dans des contextes géostatistiques où l'autocorrélation spatiale est importante. L'interpolation floue est utilisée pour modéliser l'incertitude et l'imprécision dans les données spatiales, offrant ainsi une approche plus flexible dans des situations où la frontière entre les catégories est floue. Le choix entre ces méthodes dépend des caractéristiques spécifiques des données et des objectifs de l'analyse.

DEUXIEME PARTIE

Contributions

Avant propos

Le volume d'eau extrait d'un aquifère est lié aux dimensions et à la géométrie du gisement, aux caractéristiques hydrogéologiques et aux possibilités de production des ouvrages de captages. Avant d'entamer un captage d'eaux souterraines, il faut tenir compte des questions techniques, environnementales, financières et institutionnelles. L'implantation par un professionnel comprend les études préliminaires et la reconnaissance de terrain, sans oublier la collecte, l'étude et l'utilisation des données existantes.

Dans cette partie de la thèse nous présentons l'approche adoptée pour l'élaboration d'un Système d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) en environnement imprécis pour le choix de sites d'implantation de forage de captage d'eau souterraine dans le plateau de Mostaganem.

Le SADS proposé est constitué de deux étapes principales. Dans la première étape, un SIG est utilisé pour identifier les sites potentiels de captage d'eau. Cette identification est basée sur des critères hétérogènes de sources différentes. Certains de ces critères ont été numérisés, d'autres ont été étudiés. Le chapitre 6 décrit en détail l'étude réalisée pour l'interpolation par krigeage flou de la piézométrie de la zone d'étude. Cette étude a pour objectif la détermination du critère rabattement. Les critères débit et profondeur de l'aquifère sont également étudiés et présentés dans ce chapitre.

Après avoir collecté tous les critères nécessaires, l'approche SIG est effectuée. Elle est présentée au chapitre 7. Les sites, sélectionnés par cette approche, sont classés selon une méthode Multi-Critère floue d'Aide à la Décision (MCFAD). Cette deuxième étape du SADS est développée au chapitre 8.

Chapitre 6
Interpolation floue
des données

6.1 Introduction

La collecte des données pour une analyse spatiale est une démarche importante. La fiabilité et la précision des résultats dépendent largement de la précision des données utilisées.

Faire appel à l'interpolation spatiale, pour généraliser les données ponctuelles dispersées sur l'ensemble de la zone d'étude, est une opération indispensable dans les analyses spatiales. Néanmoins, lorsque les données de départ sont imprécises, incertaines ou mal connues, cette opération devient difficile et imprécise. Les techniques d'interpolation floue, notamment les modèles d'interpolation par krigeage flou, sont généralement utilisées dans ce cas de figure (Ishibuchi, H., Nii, M, (2001); Caha et al, (2015)).

Le présent chapitre met en évidence l'interpolation floue des données relatives aux critères (piézométrie, débit et profondeur de l'aquifère) intervenant directement dans l'analyse spatiale, pour la sélection de sites potentiels de forage de captage d'eaux souterraines.

La piézométrie étant un critère prépondérant de cette analyse, son étude est détaillée dans la première partie de ce chapitre. Les critères débit et profondeur de l'aquifère sont respectivement également présentés à la section 6.3 et 6.4 du présent chapitre.

6.2 Interpolation floue de la piézométrie et carte rabattement

6.2.1 Définition et contexte

La piézométrie est la mesure de la profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface du sol. Elle est exprimée en mètres par rapport au sol ou en mètres au-dessus du niveau de la mer. La profondeur des piézomètres peut être mesurée localement par une sonde manuelle, ou continuellement à l'aide d'enregistreurs automatiques, les plus avancés transmettent des données à distance. Les mesures sont effectuées sur des puits, des forages ou des piézomètres.

La piézométrie est essentielle pour caractériser, évaluer les capacités des aquifères et comprendre leurs comportements. Elle permet aussi de découvrir les interactions entre la production des divers ouvrages. Plusieurs études ont été entreprises pour la modélisation du niveau piézométrique du plateau de Mostaganem, notamment celles de: (Lerolle, 1973), (ANRH, 2009), (Gauchez, 1981), (Baiche, 1993), (Benziane, 2009).

Pour la cartographie des niveaux piézométriques, de nombreux auteurs semblent avoir utilisé les méthodes de krigeage avec succès (Aboufirassi et Marino (1983); Maréchal (1984); Chilès (1992); Deutsch (1992); Goovaerts (1997); Chilès (1999); Bourguine et Pédrón (2011); Triki et al (2014); etc.).

Cependant, le processus d'interpolation par krigeage est fortement dépendant de la détermination appropriée d'un variogramme théorique, notamment son type et ses paramètres.

Étant donné que la précision du modèle d'estimation de la piézométrie des eaux souterraines dépend principalement des données d'entrée et du variogramme théorique, cette section met en évidence l'application du krigeage flou pour améliorer la précision de l'interpolation de la piézométrie de la nappe phréatique du plateau de Mostaganem. A la fin de cette section une carte de rabattement de la nappe du plateau est établie.

Les données utilisées dans cette analyse sont celles relevées en Juin 2016 par les services de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de Mostaganem (figure 6.1).

6.2.2 Analyse exploratoire des données piézométriques par l'extension 'GA' d'ArcGis

Avant le traitement flou de la piézométrie, une exploration détaillée des données disponibles est nécessaire pour arriver à une interpolation qui représente au mieux le phénomène étudié (Thomas, 2003).

L'extension GA (Geostatistical Analyst) d'ArcGis possède un module d'analyse exploratoire des données spatiales "AEDS" (ESDA: Exploratory Spatial Data Analysis) qui permet de visualiser et d'analyser les données selon des techniques statistiques. Ces outils permettent de mieux comprendre les phénomènes étudiés, de repérer des valeurs anormales qui ne doivent pas être considérées dans l'interpolation, ainsi que l'étude des corrélations spatiales de ces données; ce qui permettra de prendre des décisions plus éclairées sur la manière dont le modèle d'interpolation doit être construit. Avec ce module, diverses possibilités peuvent être utilisées pour détecter s'il y a une tendance ou une dérive dans les données, étudier la corrélation spatiale des données et identifier les données anormales (Johnston et al., 2001).

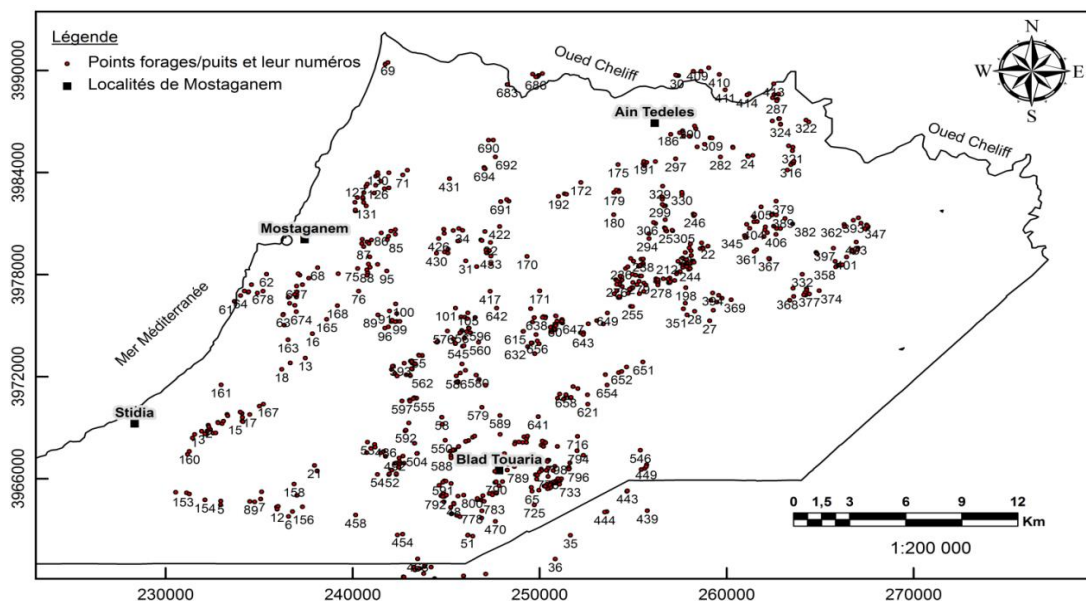


Figure 6. 1. Carte de situation des points forages et puits dans le plateau de Mostaganem. (Source de données: DRE Mostaganem, 2016)

6.2.2.1 Analyse exploratoire de la piézométrie par histogramme

L'outil histogramme de l'AEDS fournit une description détaillée de la distribution de fréquences des données piézométriques du plateau de Mostaganem. L'histogramme, de la figure 3.12, est un graphique à barres qui indique la fréquence à laquelle les valeurs piézométriques tombent dans certaines classes.

Les caractéristiques les plus importantes relatives à cette distribution sont résumées par des statistiques qui décrivent cette distribution, son étalement et sa forme.

La distribution des données, illustrée par l'histogramme de la figure 6.2, montre une série statistique plurimodale (plusieurs bosses), avec un écart de 18m entre la moyenne et la médiane. Telle quelle se présente, cette distribution n'a rien d'une distribution normale sur laquelle sont fondées la plupart des méthodes d'interpolation. Ainsi, les données doivent subir une transformation "Log" ou "Box-Cox", intégrée dans le module d'interpolation d'ArGis, avant de procéder à l'interpolation.

Le récapitulatif des statistiques présenté sur la figure 6.2 permet de faire les constatations suivantes:

1. Le coefficient d'asymétrie (Skewness= -0.39305), qui qualifie la symétrie d'une distribution, indique que la distribution des côtes piézométriques est négativement asymétrique avec un étalement des fortes valeurs à droite de l'histogramme. En effet, selon (Saporta G., 2006) qui donne les valeurs critiques de coefficient d'asymétrie d'une distribution de données pour un risque de 5% et un nombre d'observation égale à 800, le coefficient d'asymétrie doit être compris entre -0,142 et + 0,142, ce qui n'est pas le cas de cette distribution.
2. Le paramètre "kurtosis", permet de mesurer la probabilité des erreurs aberrantes produites par la distribution ainsi que son degré d'aplatissement, c'est-à-dire qu'il y a des valeurs qui s'écartent beaucoup de la moyenne. Sachant que le kurtosis d'une distribution normale (distribution sous forme de cloche pointue) est égal à 3, la valeur du "kurtosis = 1,8497", donnée par le récapitulatif, indique une distribution platykurtique présentant des valeurs aberrantes qu'il faut corriger ou exclure de l'interpolation.

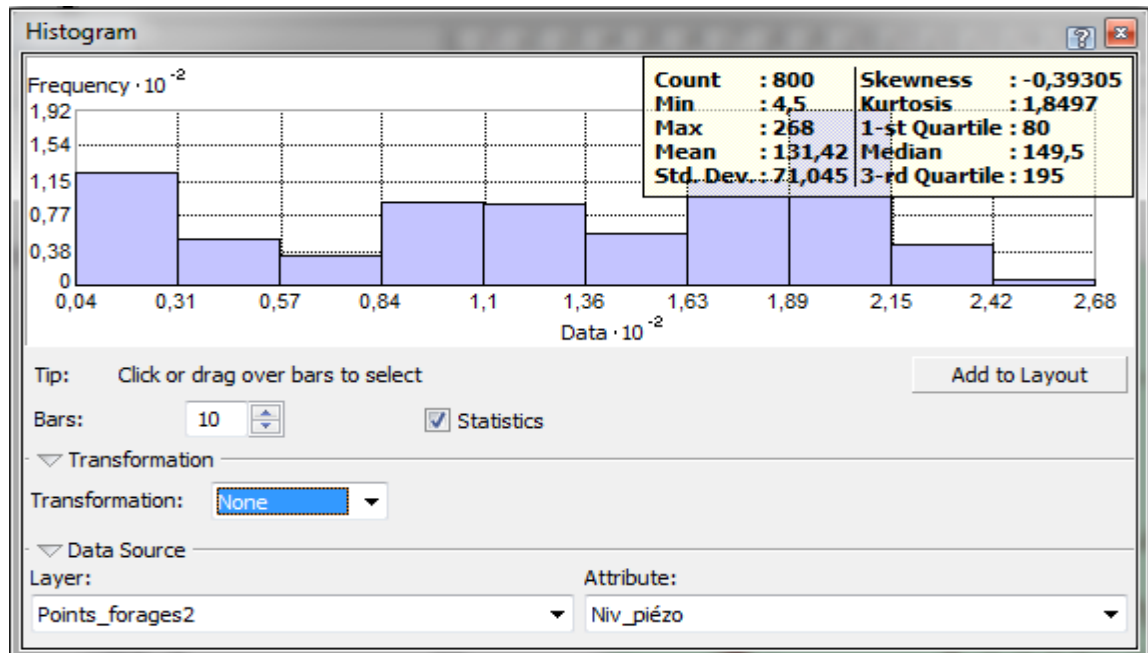


Figure 6. 2. Histogramme et statistiques du niveau piézométrique.

6.2.2.2 Analyse exploratoire de la piézométrie par les diagrammes de Voronoï

A. Diagramme de Voronoï par la méthode 'Mean'

Le diagramme de Voronoï est construit à partir d'un ensemble de polygones créés autour de chaque point d'échantillonnage. En se basant sur la notion de voisinage et en affectant à chaque polygone la moyenne calculée à partir de ce polygone et de ses voisins, on obtient la carte Voronoï 'Mean' présentée sur la figure 6.3. Cette carte nous a permis de visualiser des régions de piézométries fortes et faibles. En utilisant une échelle de couleur dégradée, on voit que le coin haut à droite de la figure 6.3 possède les valeurs les plus fortes de la zone d'étude et le coin bas à gauche de cette figure les valeurs les plus faibles. De ce fait, on peut déduire que le sens de l'écoulement des eaux souterraines va du Nord-Est au Sud-Ouest. Les polygones situés au centre de cette carte ont des superficies similaires, ce qui nous permet de dire que l'ensemble des données piézométriques sont homogènes, sauf dans les endroits où peu de données existent (c'est-à-dire aux alentours du plateau).

B. Diagramme de Voronoï par la méthode 'Cluster'

La carte Voronoï (figure 6.4) créée par la méthode 'Cluster' peut être utilisée pour aider à identifier d'éventuelles valeurs aberrantes. Cette méthode identifie les polygones qui sont dissemblables à leurs voisins environnants. En effet, la valeur enregistrée dans un polygone particulier doit être similaire à au moins un de ses voisins.

Les polygones, en gris et entourés en rouge dans la figure 6.4, correspondent aux valeurs aberrantes locales. Ces polygones correspondent aux forages n°108, 122, 137, 150, 159, 161, 172, 216, 217, 403, 410, 442, 546, 725 et 768, dont la piézométrie s'avère très différente de celle de leurs voisins proches. Ces points doivent être éliminés ou réexaminés avant l'interpolation.

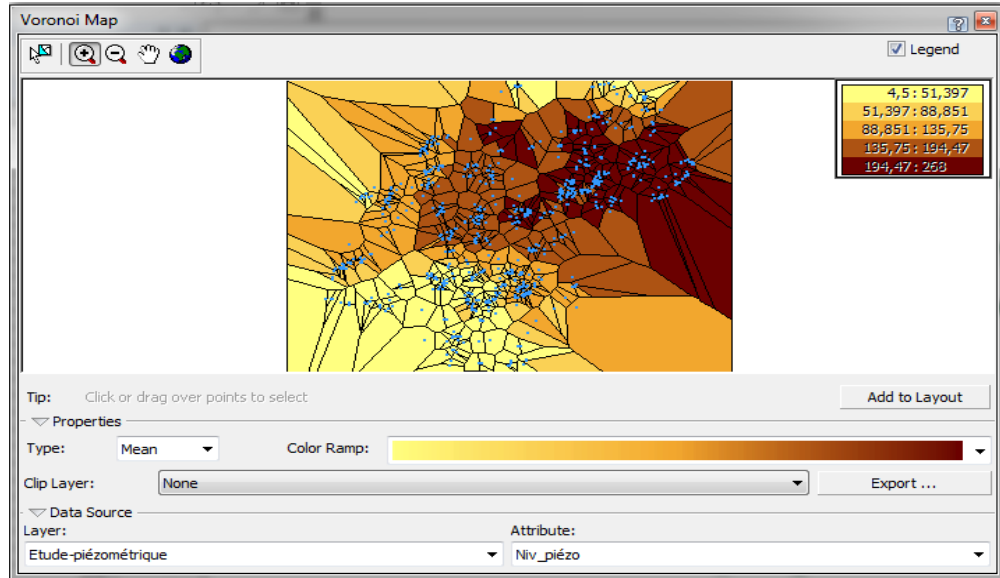


Figure 6. 3. Diagramme de Voronoi par la méthode 'Mean'.

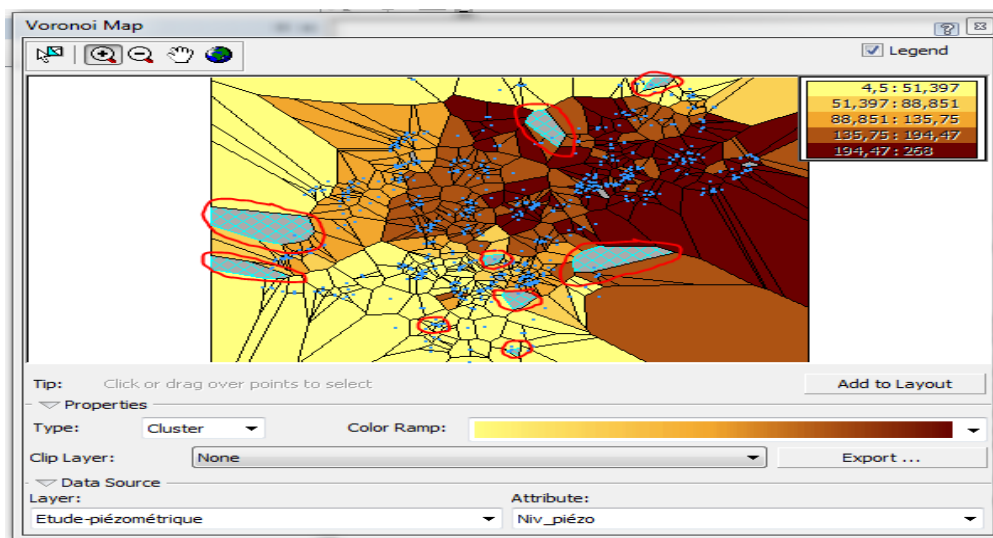


Figure 6. 4. Diagramme de Voronoi par la méthode 'Cluster'.

6.2.3 Analyse de la piézométrie par le nuage variographique

6.2.3.1 Nuage variographique omnidirectionnel

L'outil "Variogramme/Covariance cloud" de l'AEDS d'ArcGis, fournit les valeurs expérimentales de variogramme et de covariance pour toutes les paires d'emplacements dans un ensemble de données.

Le nuage variographique, présenté sur la figure 6.5, est créé en mesurant la distance entre deux emplacements et en traçant la différence au carré entre les valeurs aux emplacements. Sur l'axe des x, on reporte la distance entre les emplacements, et sur l'axe des y, on reporte la moitié de la différence de leurs valeurs au carré (semi-variance). Chaque point du variogramme représente une paire d'emplacements, et non les emplacements individuels sur la carte.

Le nuage variographique, ainsi tracé, permet de quantifier les plus ou moins bonnes corrélations du phénomène en fonction de l'inter-distance entre deux points où l'on observe ce phénomène. C'est ainsi, un outil de mesure de la continuité du phénomène et son isotropie (Bourguine B., Pédron., 2011). Les valeurs élevées du nuage variographique à petite distance permet de déceler les valeurs anormales (Thomas, 2003).

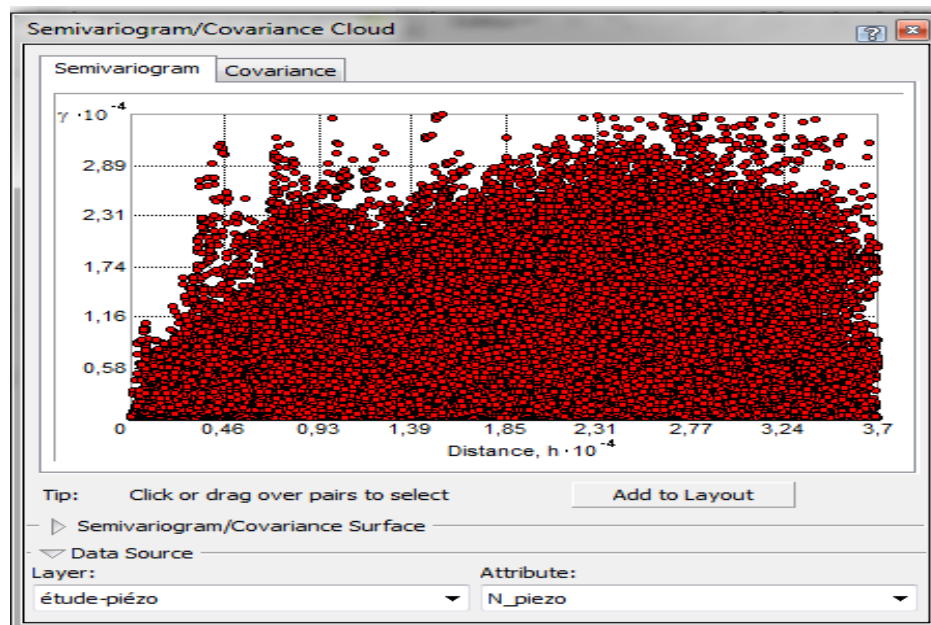


Figure 6. 5. Nuage variographique Omnidirectionnel de la piézométrie.

6.2.3.2 Localisation de valeurs aberrantes dans le nuage variographique

Si l'on examine le nuage variographique tracé pour des paires de piézomètres dont la distance de décalage (lag) est inférieure à 1,3km (figure 6.6), on constate que la valeur γ est considérablement élevée pour plusieurs échantillons proches, ce qui traduit la présence de valeurs aberrantes. Ces couples sont immédiatement repérés dans la fenêtre géographique et la table attributaire.

Un total de 56 points aberrants ont été supprimés (les points n°: 46,45,47,48,443,439,455,456,457,409,10,509,217,216,330,444,438,645,621,793,192,306,296,534,531,566,507,527,523,524,541,615,630,728,110,364,585,584,539,58,505,570,744,799,601,150,714,595,596,514,359,350,324,447,394,221).

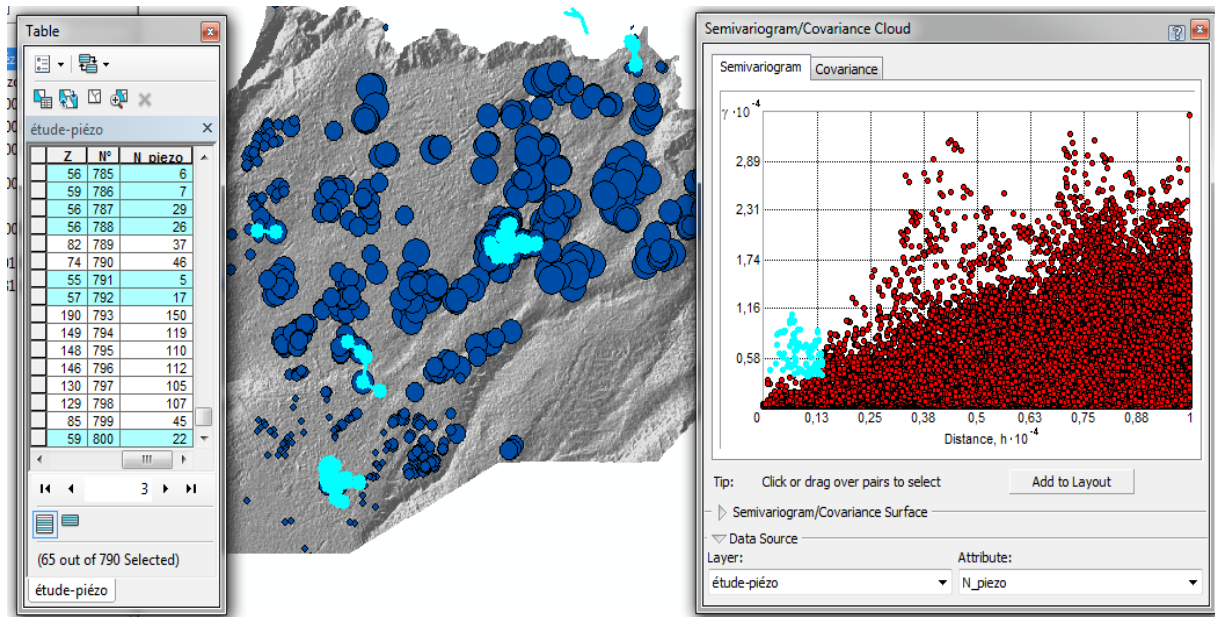


Figure 6. 6. Identification des valeurs piézométriques aberrantes dans le nuage variographique omnidirectionnel.

6.2.4 Stationnarité et Analyse de tendance dans les niveaux piézométriques

L'hypothèse principale des méthodes d'interpolations géostatistiques est la stationnarité des données. Cela signifie que deux emplacements ayant la même distance et la même direction doivent avoir la même variance des valeurs observées.

En hydrogéologie, les niveaux piézométriques changent beaucoup d'une zone à l'autre, ce qui les rend non stationnaires. Pour vérifier la stationnarité des données piézométriques de notre zone d'étude, on doit chercher s'il y a une tendance dans les données ainsi que la direction de celle-ci.

6.2.4.1 Transformation des données brutes en données normalement distribuées

La plus part des méthodes d'interpolations, notamment le krigeage, repose sur l'hypothèse de la stationnarité. Cette hypothèse exige, en partie, que toutes les valeurs des données proviennent de distributions normales.

Les transformations des données source peuvent être utilisées pour rendre les données brutes normalement distribuées et satisfaire l'hypothèse d'une variabilité égale pour tout l'ensemble.

En utilisant la transformation BoxCox (transformation exponentielle) (figure 6.7), disponible dans l'outil histogramme de Geostatistical Analyst, avec une valeur de paramètre (puissance de la fonction exponentielle) égal à 1.74, la valeur de la Skewness s'approche de la valeur 0 et on obtient donc une distribution des données piézométriques normale.

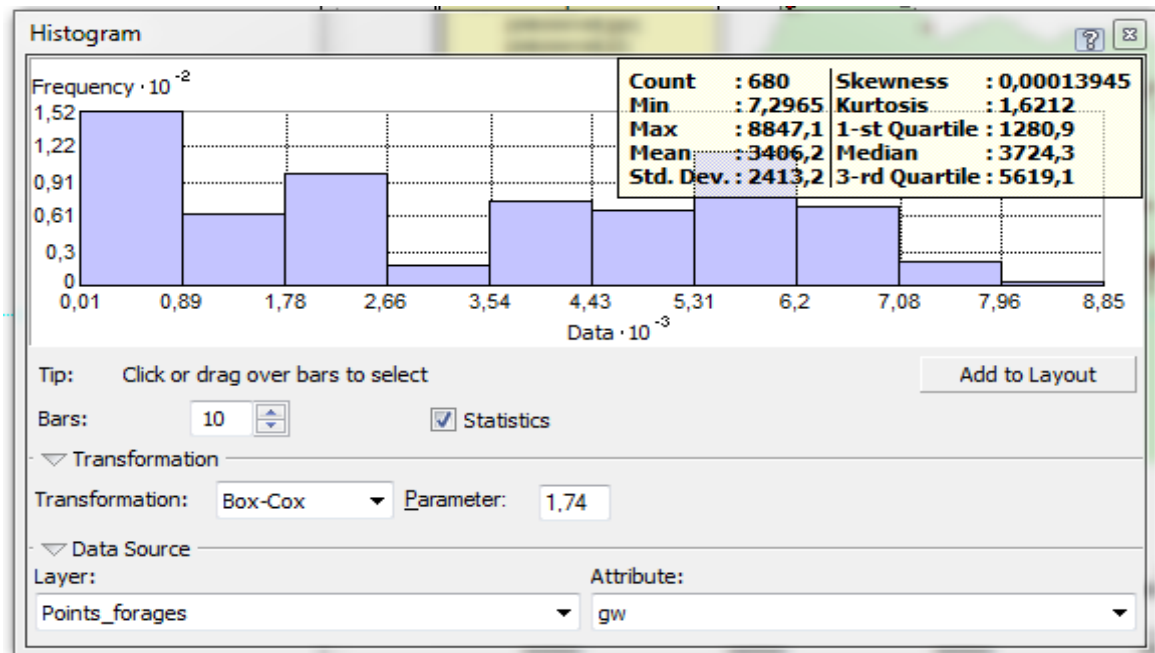


Figure 6. 7. Transformation des données brutes en données normalement distribuées.

6.2.4.2 Analyse de tendance avec ArcGis

L'outil d'analyse de tendance d'ArcGis permet d'identifier la présence d'une dérive qui est considérée comme la tendance moyenne de la variable (Cardenas, 2004). Cet outil fournit une vue en trois dimensions des données piézométriques. Les emplacements des points forages sont tracés sur le plan x, y (points rouge sur la figure 6.8). L'intérêt de l'outil d'analyse de tendance réside dans le fait que les valeurs sont ensuite projetées sur les plans [x, z] et [y, z] (les points verts et les points bleus respectivement sur la figure 6.8) en tant que diagrammes de dispersion.

Après ajustement de la direction, on constate que le nuage de nos points montre une relation entre valeurs de points et directions. Cette fonction a tendance à être cernée entre la direction 0° et 320°. Cependant, elle est plus accentuée selon la direction de 270°. En effet, cette direction, vers la ville de Mostaganem, correspond au sens principal de l'écoulement de la nappe d'eau.

La figure 6.8, révèle la présence d'une dérive, sur les courbes verte et bleu évaluées par un polynôme d'ordre 2 dans la direction 270°. L'existence d'une dérive implique le calcul de nouveaux paramètres. Le degré de la dérive doit être gardé aussi bas que possible car, plus il y a de coefficients à estimer, moins le modèle est précis.

Pour cette raison, les résultats ont été testés en utilisant successivement les dérives d'ordre 1 et 2 pour trancher au choix de l'ordre de la dérive. Finalement la dérive d'ordre 1 est choisie.

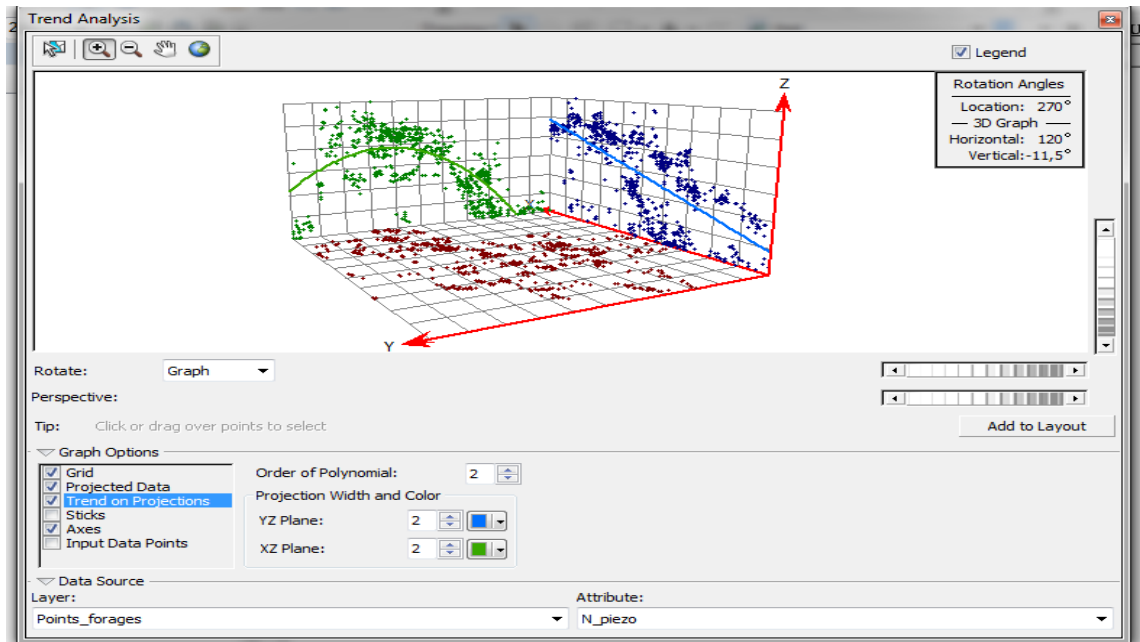


Figure 6. 8. Identification d'une tendance dans les niveaux piézométriques selon la direction 270°

6.2.5 Variogramme expérimental omnidirectionnel

Le variogramme expérimental omnidirectionnel du plateau de Mostaganem a été d'abord établi en considérant toutes les directions (Voir figure 6.9). Ce variogramme est estimé sur une distance totale d'environ 37 km (cutoff =37km) et une distance de décalage égale à 100m. Le pas d'échantillonnage, ainsi choisi, vise à disposer d'un nombre suffisant de couples de points pour que le variogramme expérimental puisse révéler « au mieux » la continuité spatiale de la piézométrie.

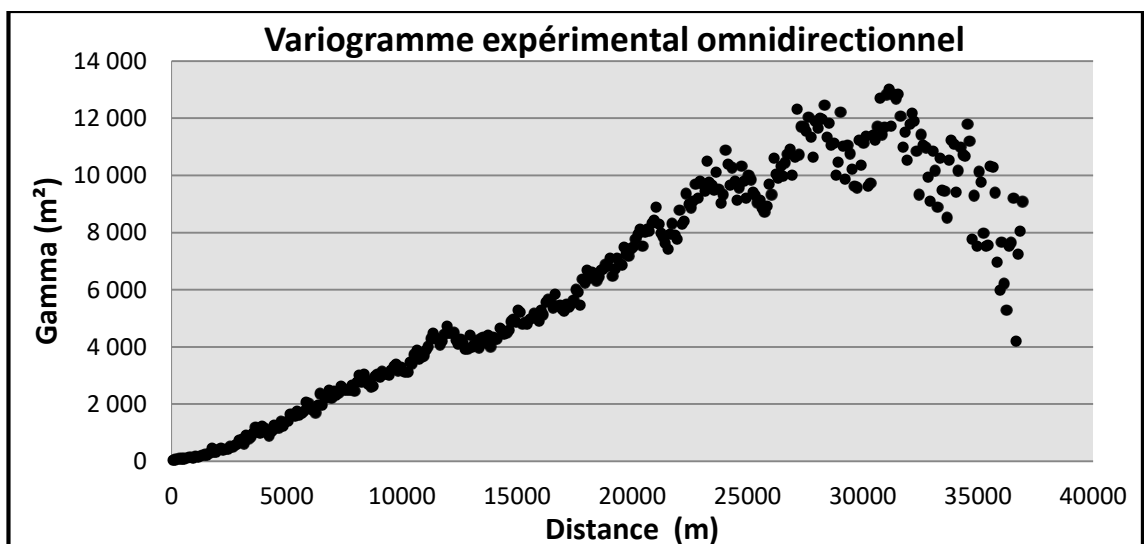


Figure 6. 9. Variogramme expérimental omnidirectionnel.

6.2.6 Anisotropie et variogrammes expérimentaux directionnels

En hydrogéologie, la piézométrie est reconnue d'être un phénomène anisotrope, puisque les fluctuations de la charge hydraulique ne se font pas de la même manière dans toutes les directions (à cause de la nature des terrains que l'eau traverse, la structure, l'effet de pompage, etc.). Il est alors nécessaire de créer des variogrammes directionnels pour explorer l'anisotropie de notre jeu de données.

La figure 6.10 présente les variogrammes directionnels calculés selon les directions 0° , 45° , 90° et 135° . Le calcul des variogrammes omnidirectionnels dans les quatre (04) directions de l'espace avec un angle de tolérance égal à $22,5^\circ$, signifie qu'on a balayé toute les 360° de la zone d'étude, puisque le calcul d'un variogramme dans une direction AB est exactement le même que celui calculé dans la direction inverse $BA=AB+180^\circ$.

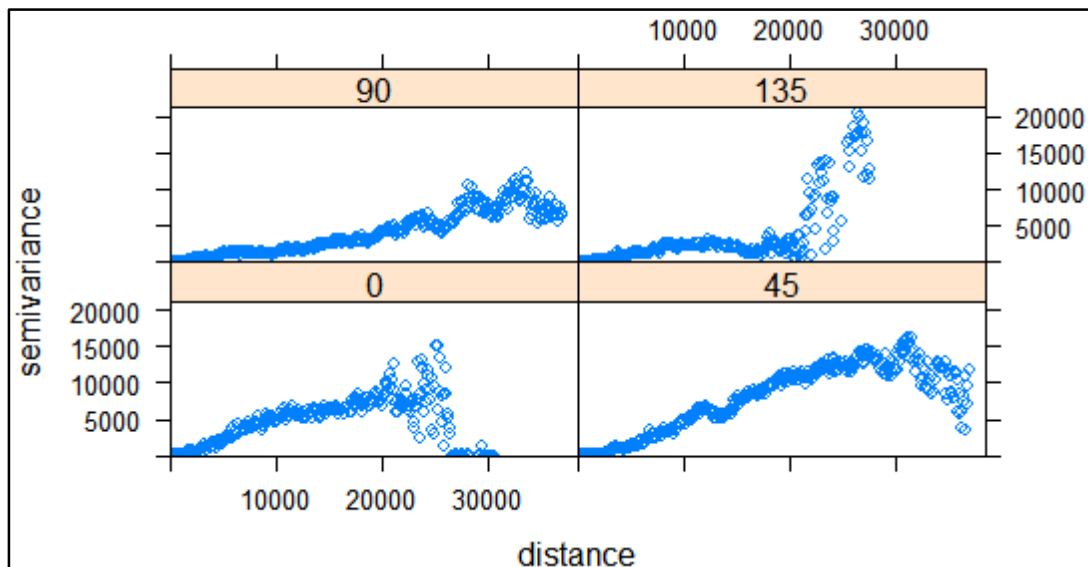


Figure 6. 10. Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0° (idem 180°), 45° (idem 225°), 90° (idem 270°) et 135° (idem 315°).

Les variogrammes directionnels correspondants aux directions 90° et 45° représentent plus d'informations et de données que les deux autres variogrammes. En effet, avec des étendues totales qui dépassent les 35000m , ces deux variogrammes représentent au mieux l'échantillonnage de notre zone d'étude.

La figure 6.11, permet également d'illustrer beaucoup mieux les quatre variogrammes directionnels. Ils révèlent une anisotropie géométrique, puisque pour le même palier, qui est défini par une variance égale à $4734,679\text{m}^2$ et indiqué par la ligne mauve discontinue sur la figure 6.11, on obtient différentes étendues chacune selon une direction différente.

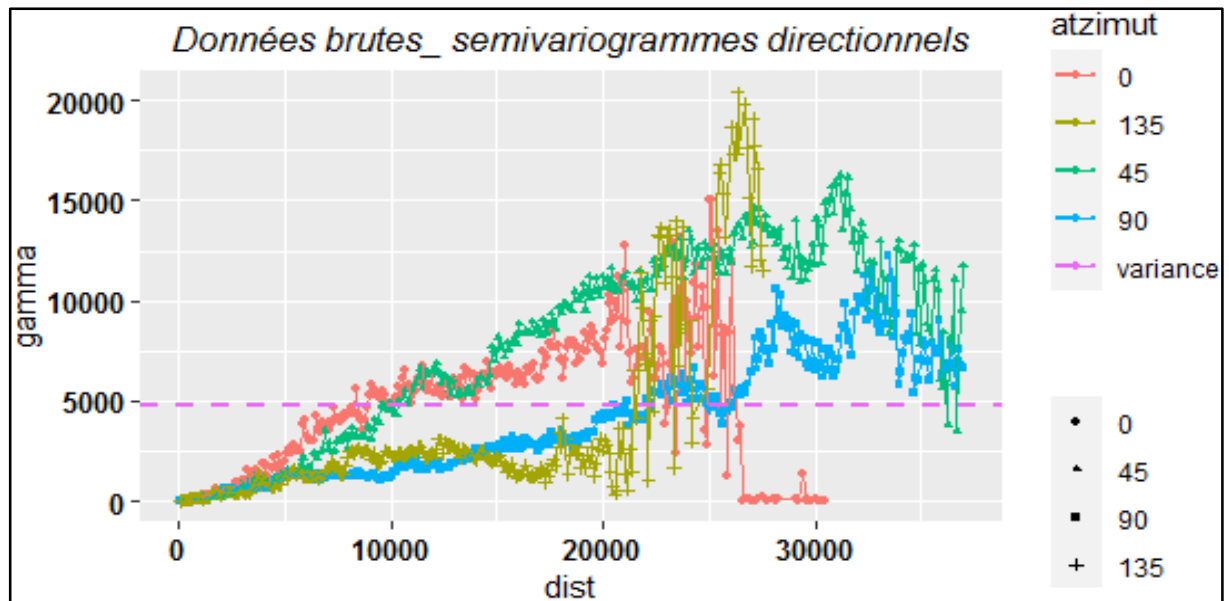


Figure 6. 11. Variogrammes directionnels selon les quatre directions 0° , 45° , 90° et 135° et variance.

Pour le même palier on obtient donc, les étendues suivantes:

- Pour le variogramme expérimental calculé selon la direction 0° : une étendue mineure d'environ 5000m.
- Pour le variogramme expérimental calculé selon la direction 45° : une étendue mineure d'environ 8000m.
- Pour le variogramme expérimental calculé selon la direction 90° : une étendue mineure d'environ 20000m.
- Pour le variogramme expérimental calculé selon la direction 135° : une étendue mineure d'environ 23000m.

Les variogrammes définis selon les directions 45° et 90° représentent le mieux les données piézométriques avec une étendue majeure totale d'environ 37km. Ces deux directions correspondent respectivement aux directions Sud-ouest et Ouest du plateau de Mostaganem. Ce sont les principales directions du gradient hydraulique et donc du sens de l'écoulement des eaux souterraines. Cependant, la direction 90° semble être la direction principale d'anisotropie avec une étendue mineur la plus grande des deux directions 45° et 90° (voir figure 6.12).

La carte variographique, illustrée sur la figure 6.12, permet également de déceler une anisotropie géométrique, puisque les étendues relatives aux directions 0° et 90° décrivent une ellipse.

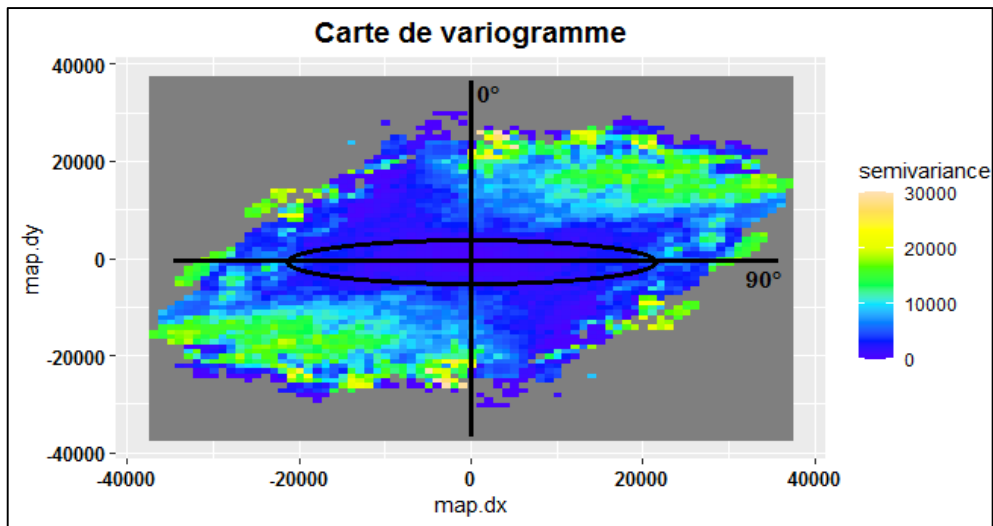


Figure 6. 12. Carte de variogramme illustrant l'anisotropie dans l'ensemble de données.

6.2.7 Variogramme expérimental directionnel des résidus

Selon le variogramme directionnel correspondant à la direction principale d'anisotropie (90°) (figure 6.13), on constate que seules les données piézométriques calculées pour une étendue d'environ 20000m sont spatialement corrélées. De ce fait, la modélisation du variogramme expérimental doit se faire pour cette étendue.

Il est également nécessaire d'éliminer la tendance des données pour garantir le principe de stationnarité (moyenne et variance connues est constantes). Donc, il faut ajuster les données à une surface de tendance, de soustraire la surface de tendance et d'ajuster le variogramme aux résidus.

Dans cette étude un modèle de tendance avec courbe polynomiale d'ordre un a été soustrait de toutes les observations, et les résidus ont été obtenus. Les piézométries résiduelles ont ensuite été utilisées comme entrée dans l'estimation du variogramme des résidus (c'est-à-dire le variogramme sous-jacent libre de la tendance) voir figure 6.13.

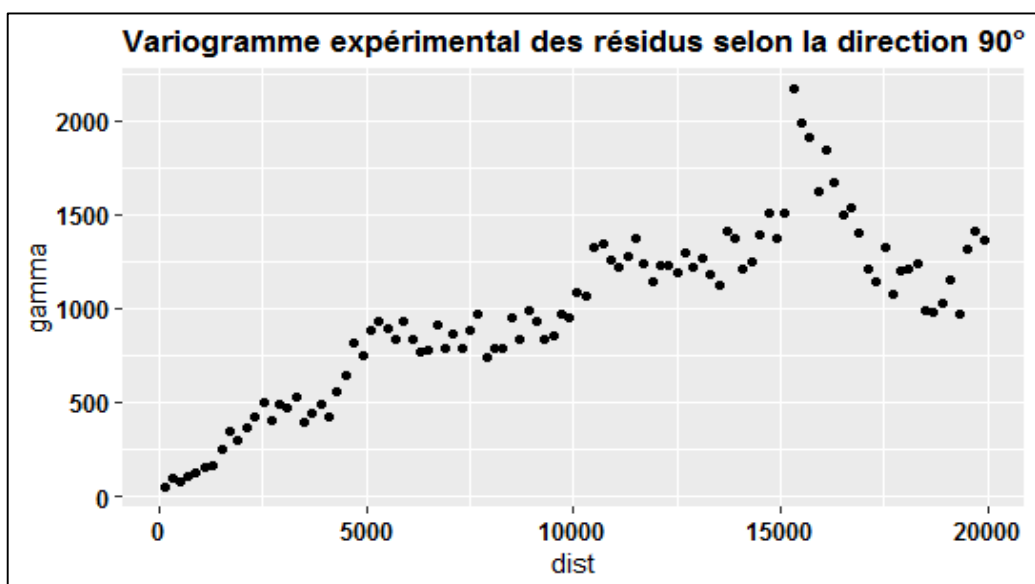


Figure 6. 13. Variogramme directionnel des résidus selon la direction 90° et une portée de 20km.

6.2.8 Modèle théorique

Adapter un modèle théorique au variogramme expérimental est une étape fondamentale située entre la description spatiale et l'interpolation spatiale des données piézométriques. Cette étape consiste à ajuster un modèle au variogramme expérimental des résidus selon les points formant ce dernier. Pour cette étude un choix parmi les trois modèles théoriques les plus utilisés a été fait. En effet, après avoir ajusté les trois modèles théoriques, calculés avec les mêmes paramètres préliminaires (effet de pépite, palier et portée), le modèle sphérique semble être le plus adéquat au variogramme expérimental des résidus (voir figure 6.14).

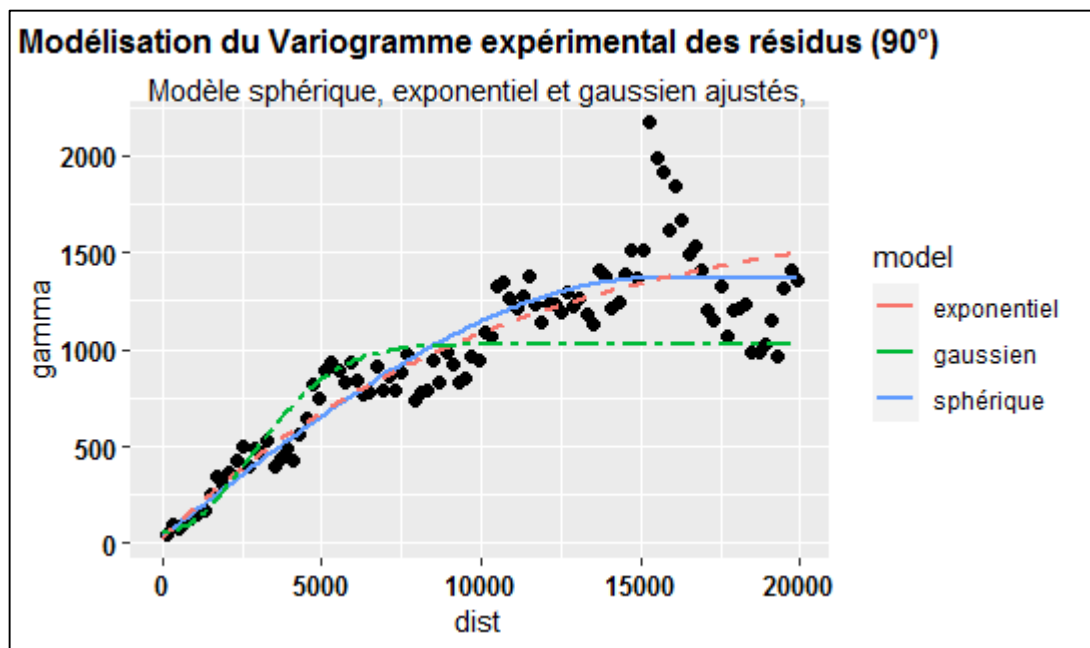


Figure 6. 14. Variogramme expérimental directionnel des résidus (points noirs) et modèles ajustés.

6.2.9 Mise en œuvre du Krigeage flou

6.2.9.1 Paramètres du variogramme flou

Une fois le modèle théorique choisi, il faut l'adapter correctement au variogramme empirique. Le choix correct du variogramme théorique dépend du choix correct de ses paramètres : effet de pépite, seuil (palier) et la portée.

Le variogramme empirique de la zone d'étude est plutôt compliqué et la sélection d'un variogramme théorique correct avec des paramètres corrects est difficile. La solution à ce problème, adoptée dans cette recherche, est l'utilisation d'un variogramme flou (Figure 6.15).

Pour l'estimation de la piézométrie du plateau de Mostaganem, la variante du krigeage flou basée sur les idées présentées à l'origine par (Bardossy et al, 1990; 1988) et développées par (Loquin, K. et Dubois, D., 2010) et (Caha, j et al; 2015) est utilisée (voir chapitre 5, section 5.5).

L'auteur (Caha, j et al; 2015), propose un programme de calcul du variogramme flou. Il est implémenté sous le logiciel R.

Après plusieurs itérations et essais de calcul, les paramètres du variogramme flou sont déterminés. Ils sont modélisés sous forme de nombres flous triangulaires avec valeurs minimales, modales et maximales (voir tableau 6.1).

Paramètres (m)	Valeur Minimale	Valeur modale	Valeur Maximale
Portée (r)	15500	13000	10000
Palier (Seuil) (s)	950	1200	1450
Effet de pépite (η)	10	30	70

Tableau 6. 1. Paramètres du variogramme flou sphérique de la piézométrie.

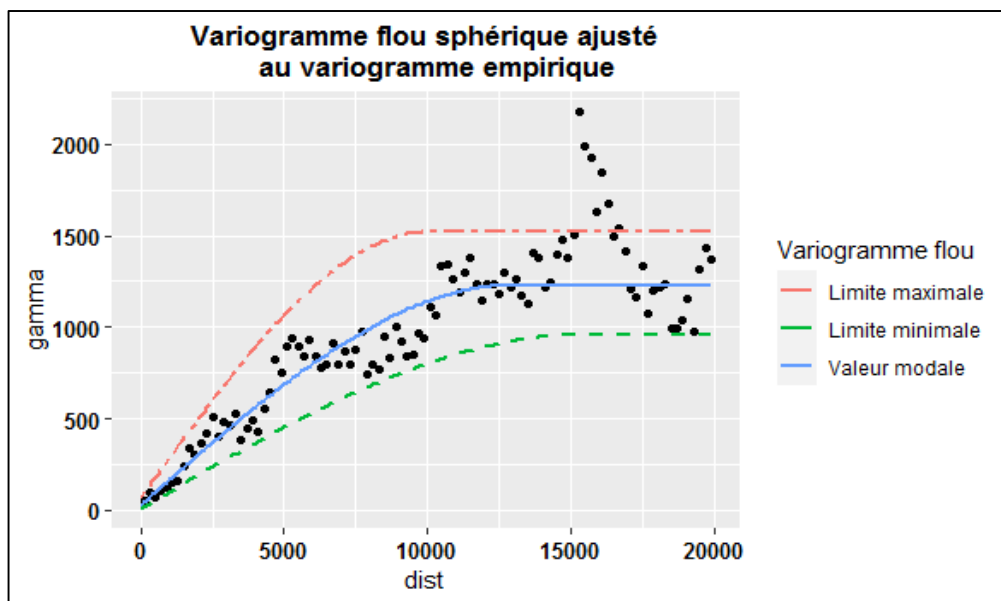


Figure 6. 15. Variogramme flou sphérique estimé (valeur minimale, modale et maximale) ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des niveaux piézométriques.

6.2.9.2 Carte d'interpolation floue de la piézométrie du plateau de Mostaganem

Pour cette étude, l'interpolation des niveaux piézométriques par krigeage flou est calculée sur une grille couvrant le plateau de Mostaganem avec une taille de cellule de 250m \times 250m (exprimée en coordonnées projetées).

La figure 6.16 représente le résultat du krigeage flou des niveaux piézométriques du plateau de Mostaganem en utilisant les valeurs modales des paramètres du variogramme flou et qui représentent les valeurs les plus probables du modèle d'interpolation.

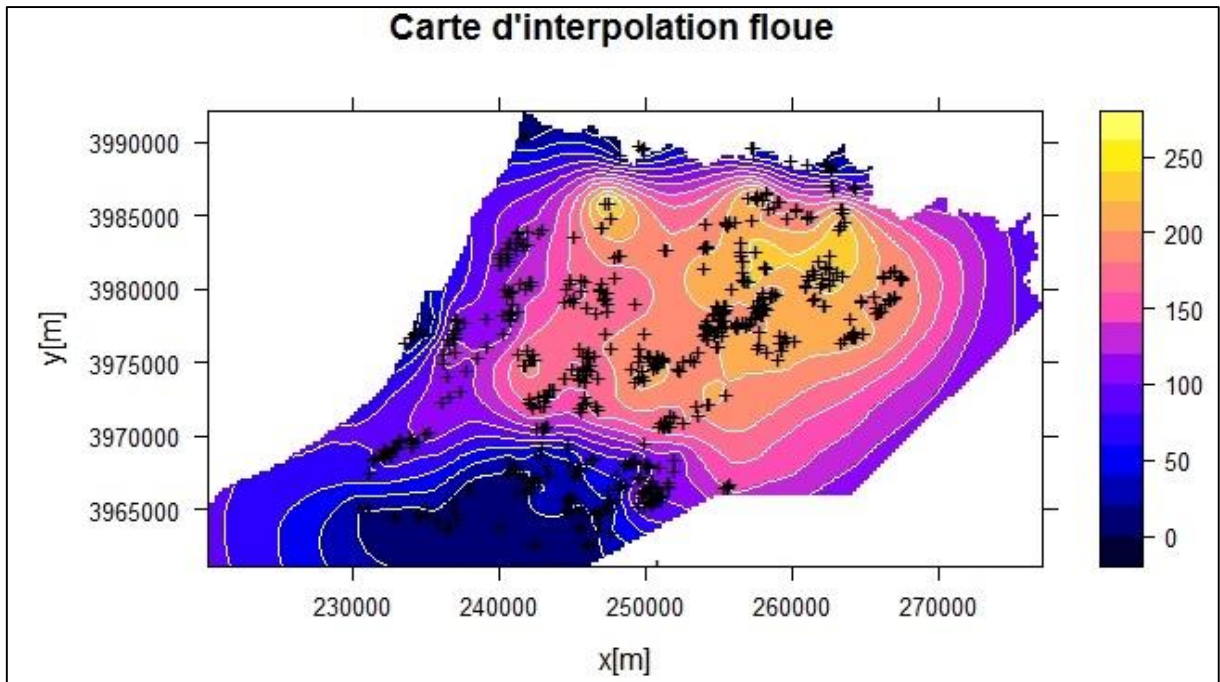


Figure 6. 16. Valeurs modales de la surface floue du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).

6.2.9.3 Calcul des limites minimales et maximales de l'interpolation floue

Pour le calcul des limites \underline{z}^0 (valeur minimale) et \bar{z}^0 (valeurs maximales) de l'interpolation floue des niveaux piézométriques, les équations 5.12 et 5.13, présentées au chapitre 5, section 5.5.3 sont utilisées.

L'approche originale de (Bardossy et al; 1990) ne propose aucune méthode pour optimiser le calcul. Loquin et al; (2010) et Loquin et al; (2012) notent que, sur la base de leurs observations empiriques, les limites de l'interpolation sont souvent atteintes pour les p-uplets formées par les bornes de \bar{a} .

Sur la base de cette observation, les auteurs suggèrent de calculer les résultats préliminaires en utilisant des variantes 2^p de a . Les valeurs obtenues de \underline{z}^0 et \bar{z}^0 à l'aide du krigeage flou constituent avec une forte probabilité les vraies limites des interpolations floues des niveaux piézométriques $\tilde{z}^*(x_0)$. L'auteur (Caha, j et al; 2015), propose un programme de calcul de ces valeurs minimales et maximales. Ce programme est utilisé pour le calcul des limites minimales et maximales des interpolations piézométriques de la zone d'étude.

La figure 6.17 représente les limites supérieures et inférieures des interpolations floues du niveau piézométrique du plateau de Mostaganem.

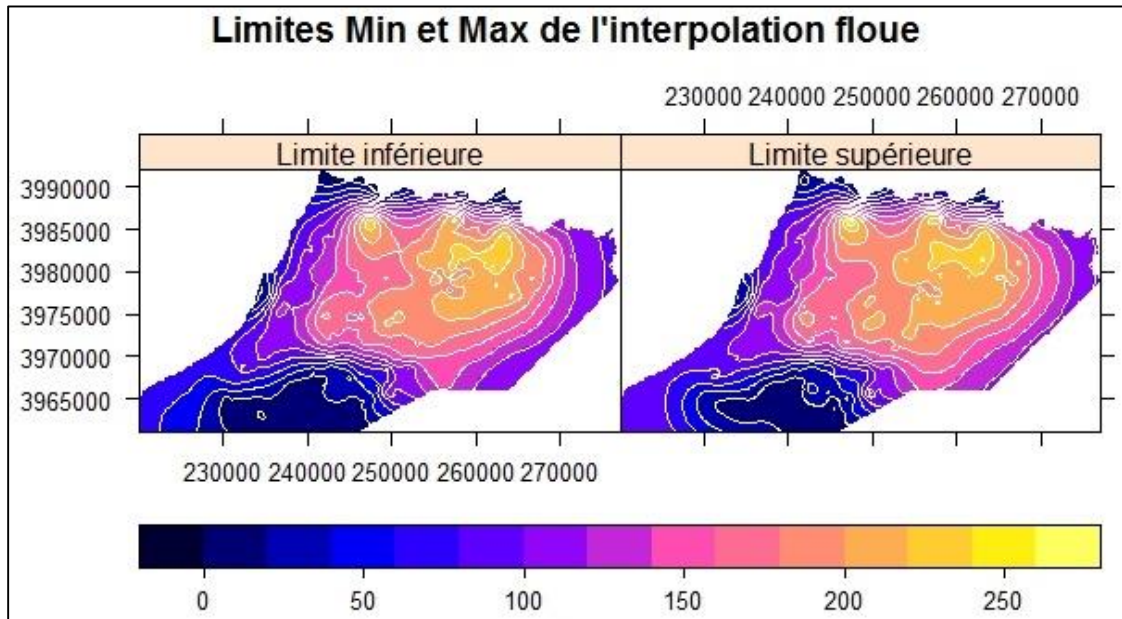


Figure 6. 17. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues du plateau de Mostaganem.

6.2.9.4 Largeur des estimations floues

La figure 6.18 représente la carte des largeurs des estimations floues sur tout le plateau de Mostaganem. Cette largeur est déduite par la différence entre les limites maximales et limites minimales des interpolations floues. Cette largeur constitue donc, la précision des interpolations floues sur toute la zone d'étude.

On remarque toutefois que, dans les zones sous échantillonnées (limite Sud-Est et Sud-Ouest de l'aquifère) la largeur des interpolations floues est élevée, ce qui rend l'incertitude sur les interpolations floues dans ces endroits plus importante.

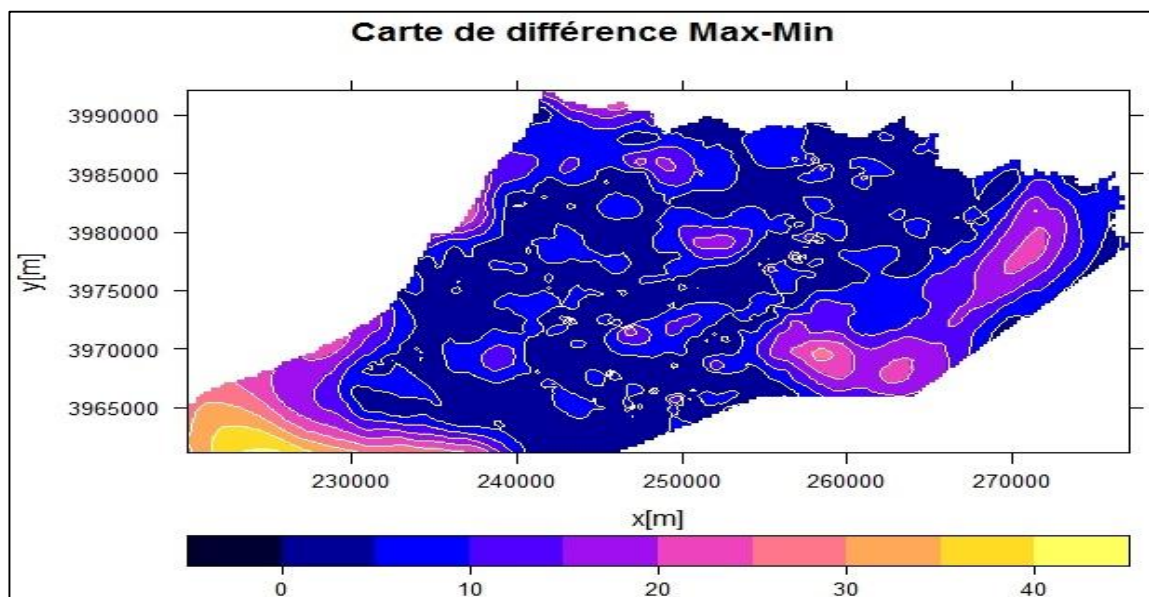


Figure 6. 18. Largeurs des estimations floues de $\bar{z}^0 - \underline{z}^0$ du plateau de Mostaganem.

6.2.10 Validation croisée

Pour vérifier la qualité du krigeage, on a utilisé la méthode de validation croisée. Pour cette étude, un ensemble de 679 points ont servi à construire le modèle et un ensemble de 50 points indépendants ont servi à la validation. Ces points sont bien répartis dans la zone d'étude et choisis d'une façon aléatoire (voir figure 6.19).

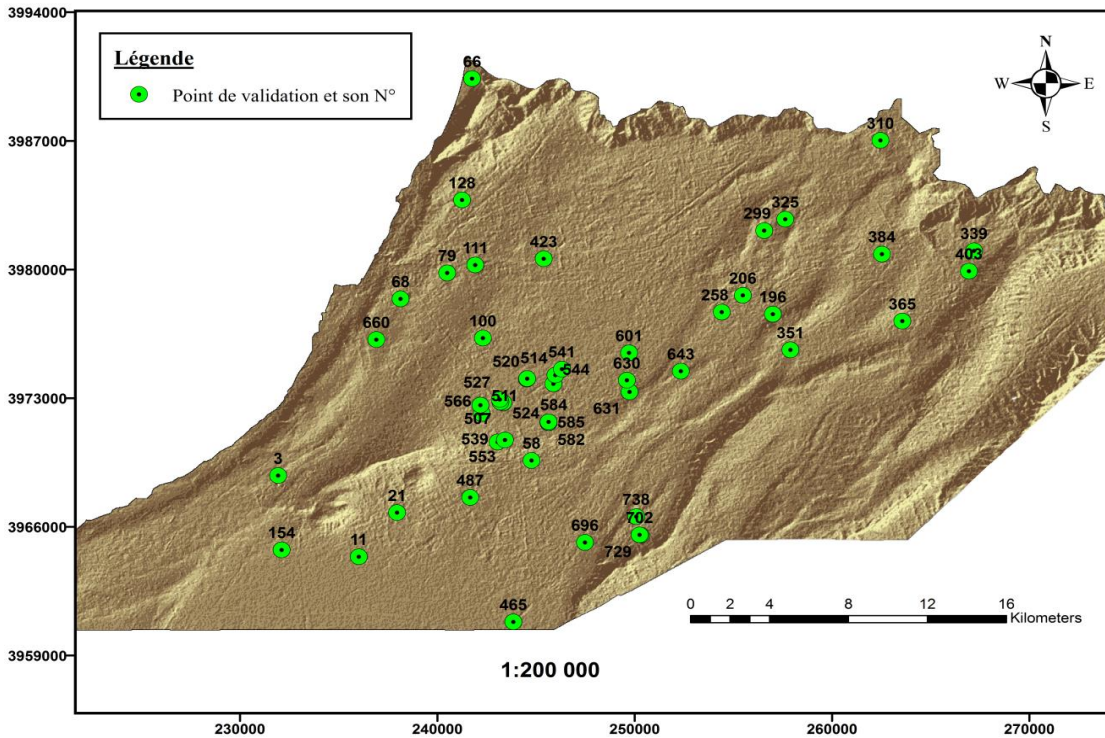


Figure 6. 19. Carte de situation des points de validation.

La figure 6.20 montre la dispersion des points réels par rapport à la moyenne floue (valeurs modales) ; le coefficient de corrélation (0,87) et la pente de la droite de régression (0,918) sont proches de 1 (les valeurs souhaitables).

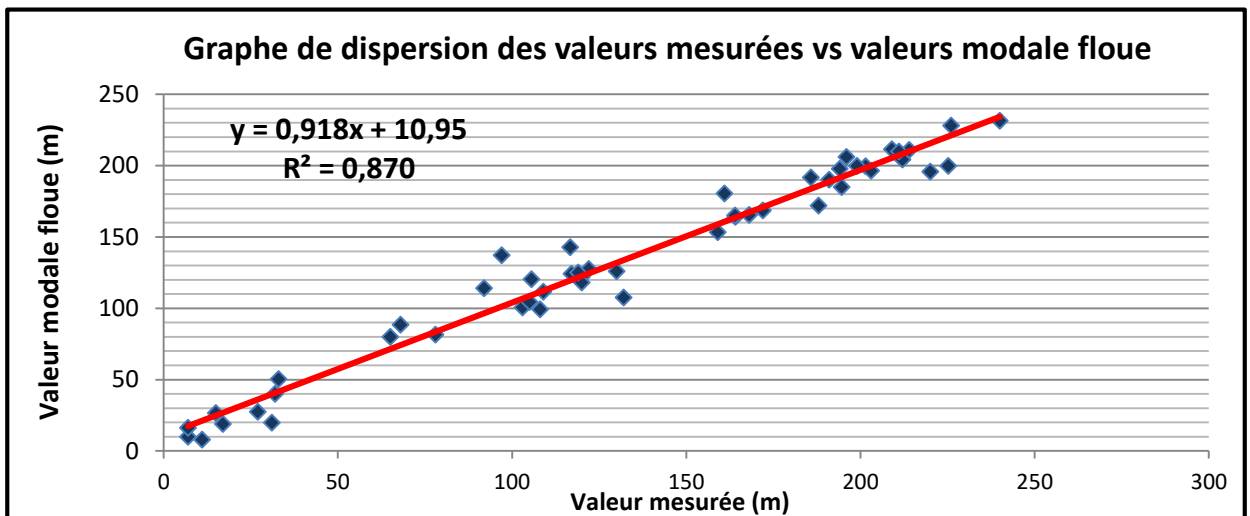


Figure 6. 20. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés et les valeurs piézométriques modales floues estimées

La figure 6.21 montre une comparaison des valeurs mesurées réelles (vraies) avec la largeur des estimations floues pour les échantillons sélectionnés pour la validation croisée.

Comme indiqué, dans la plupart des cas, la valeur réelle réside entre les extrêmes inférieur et supérieur flous.

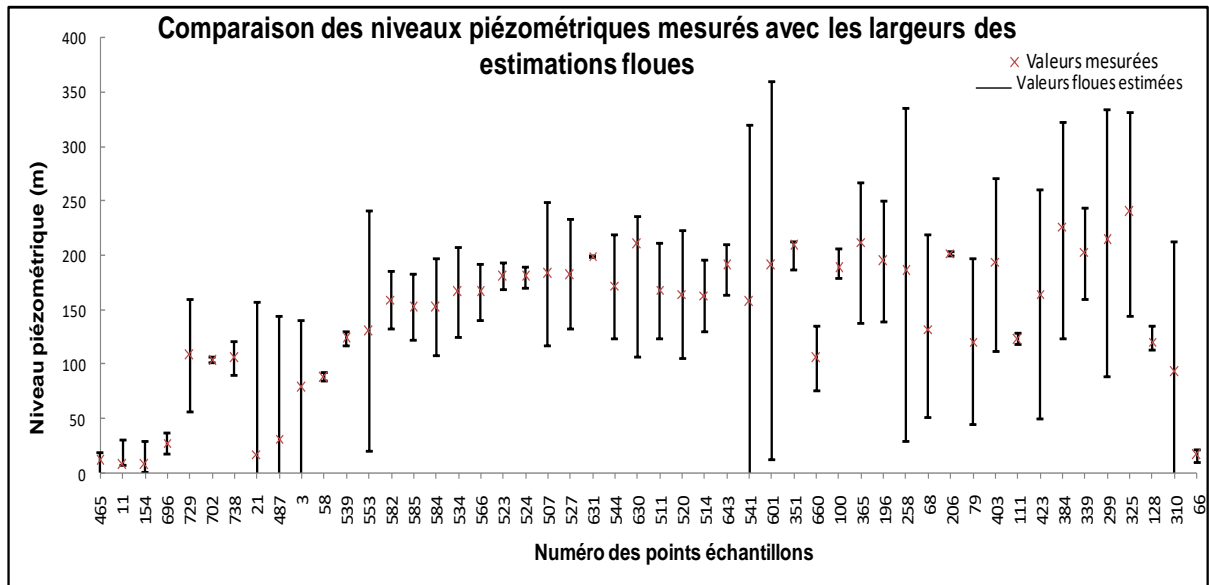


Figure 6. 21. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés avec les largeurs des estimations floues

6.2.11 Rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem

Afin d'éviter l'implantation de points de captage d'eau dans des sites à grand risque de rabattement, et d'en produire des forages échoués, le critère rabattement doit être pris en considération dans l'analyse des résultats.

En effet, la concentration accrue de forages et puits dans le centre et l'ouest du plateau a conduit à une surexploitation de la nappe. Le pompage continu de ces forages a induit une baisse considérable du niveau piézométrique de cette nappe, qui varie entre 2 et 20m selon le rapport de SOGREAH (ANRH, 2009).

La comparaison de la carte piézométrique floue résultante de notre étude piézométrique (décrite dans la section ci-dessus et relative aux données piézométriques 2016) et la carte piézométrique du plateau de Mostaganem (Gauchez., 1981) (voir figure 6.22), a permis de déduire la carte de rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem (voir figure 6.23). Une diminution considérable des niveaux piézométriques est constatée au centre du plateau, elle est de l'ordre de 6 à 16m.

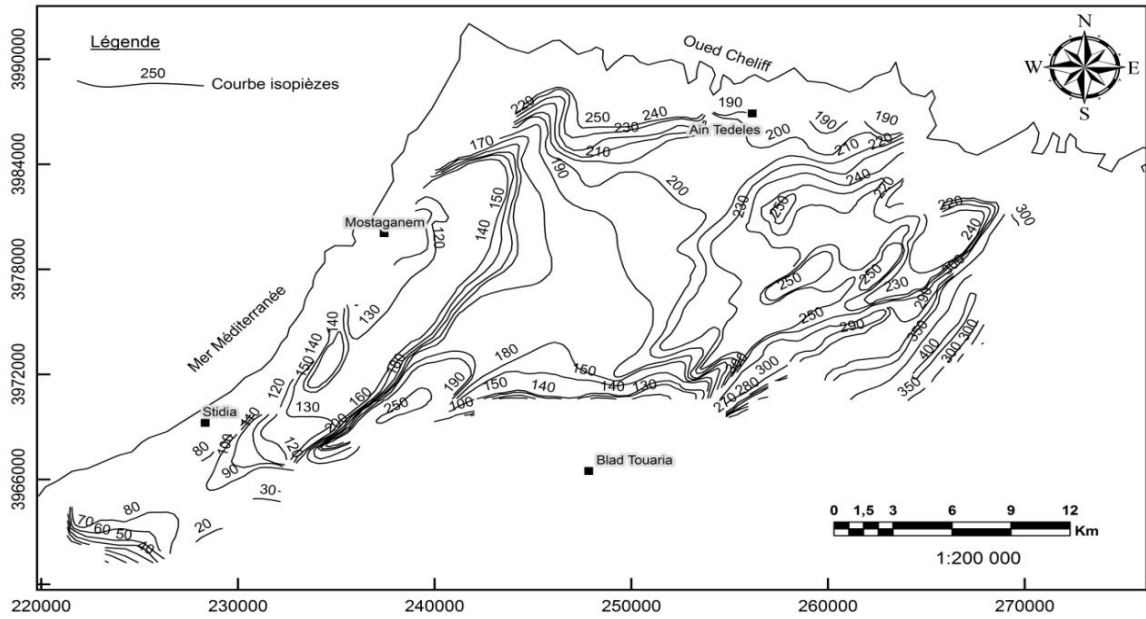


Figure 6. 22. Carte piézométrique du plateau de Mostaganem (Gauchez., 1981)

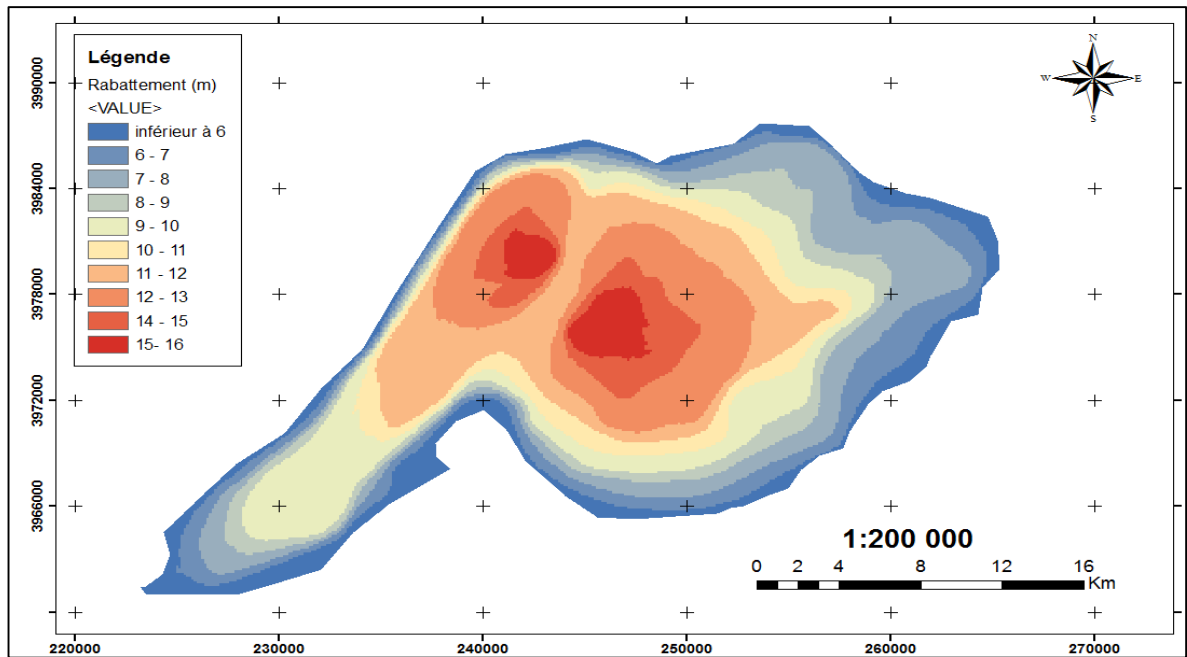


Figure 6. 23. Carte de Rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem (Période 1981-2016)

6.3 Interpolation floue du critère débit

6.3.1 Définition

Le débit d'un forage est le volume d'eau extrait d'un forage par unité de temps, qui est exprimé habituellement en m^3/h .

Le débit d'eau d'un forage est calculé pendant les essais de pompage. Pour les forages qui puisent directement l'eau de la nappe phréatique ou d'une veine d'eau souterraine, le débit est relativement grand et constant, contrairement à un puits d'eau.

6.3.2 Carte d'interpolation floue du débit

Les données débits des forages et puits, situés dans la région du plateau de Mostaganem (voir figure 6.1), sont fournies par les services de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de Mostaganem.

La distribution spatiale des débits est représentée sur la figure 6.24.

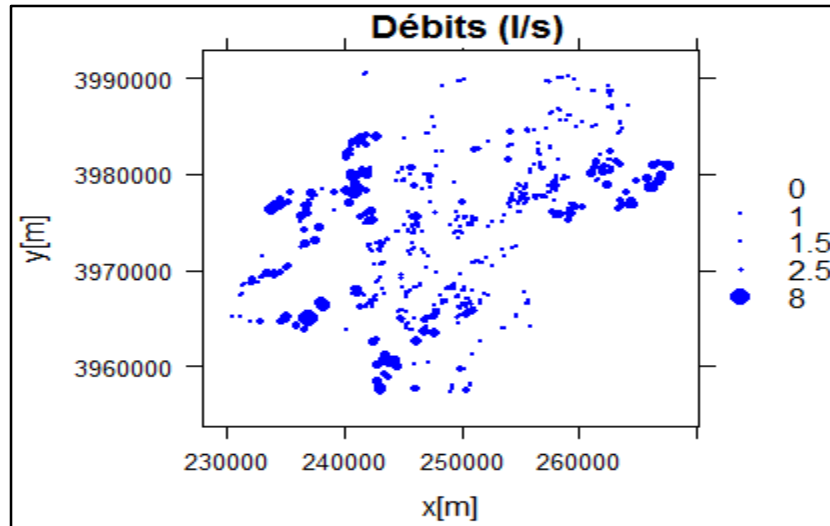


Figure 6. 24. Distribution spatiale des débits sur le plateau de Mostaganem

Paramètres (m)	Valeur Minimale	Valeur modale	Valeur Maximale
Portée (r)	9500	9000	8000
Palier (Seuil) (s)	1.3	1.45	1.55
Effet de pépite (η)	0.35	0.45	0.56

Tableau 6. 2. Paramètres du variogramme flou exponentiel relatifs au critère débit.

Pour l'établissement de la carte débit du plateau de Mostaganem, le krigeage flou est appliqué. Après plusieurs itérations et essais de calcul, les paramètres du variogramme flou sont déterminés (voir tableau 6.2). Un variogramme flou exponentiel est ajusté au variogramme empirique (voir figure 6.25).

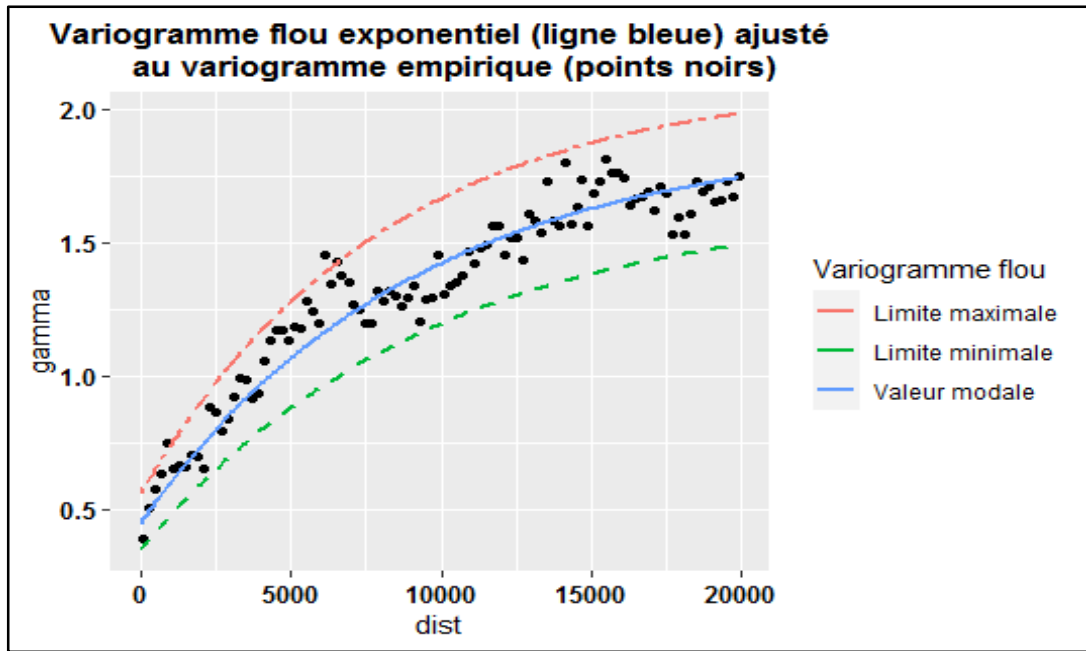


Figure 6. 25. Variogramme flou exponentiel estimé (valeur minimale, modale et maximale) et ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des débits.

La figure 6.26 représente le résultat du krigeage flou des débits des forages et puits du plateau de Mostaganem en utilisant les valeurs modales des paramètres du variogramme flou et qui représentent les valeurs les plus probables du modèle d'interpolation. L'interpolation par krigeage flou est calculée sur une grille couvrant le plateau de Mostaganem avec une taille de cellule de 250m × 250m (exprimée en coordonnées projetées).

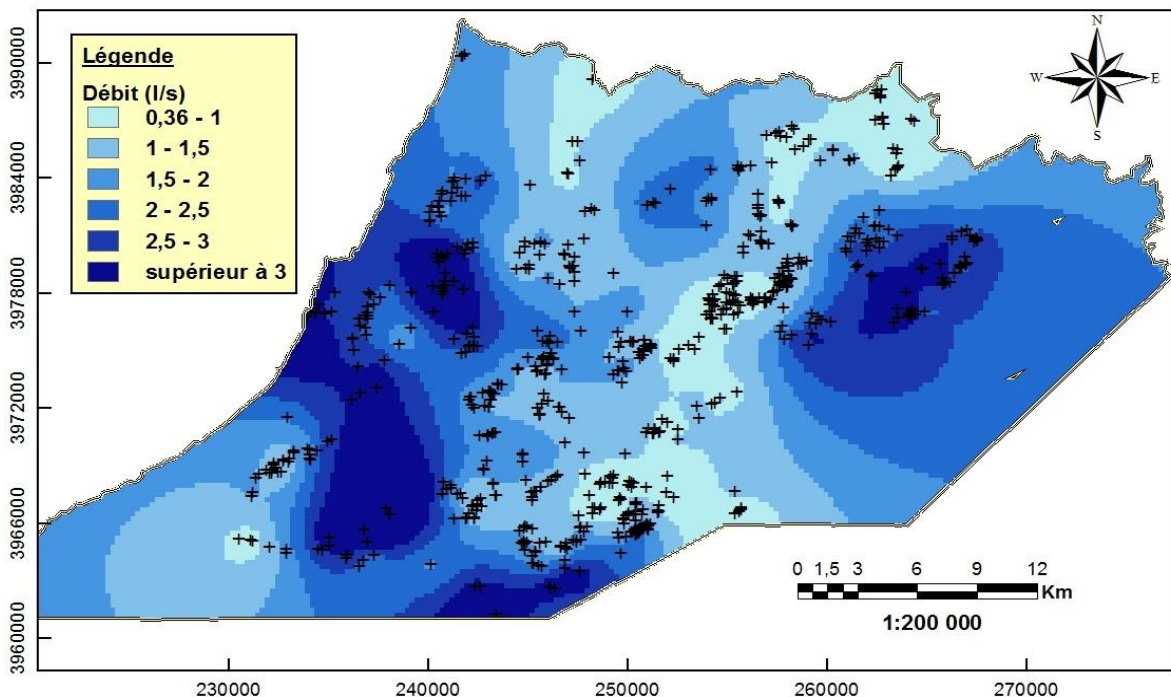


Figure 6. 26. Valeurs modales de la surface floue des débits du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).

6.3.3 Limites Min et Max de l'interpolation floue

La figure 6.27 représente les limites inférieures et supérieures des interpolations floues des débits du plateau de Mostagnem.

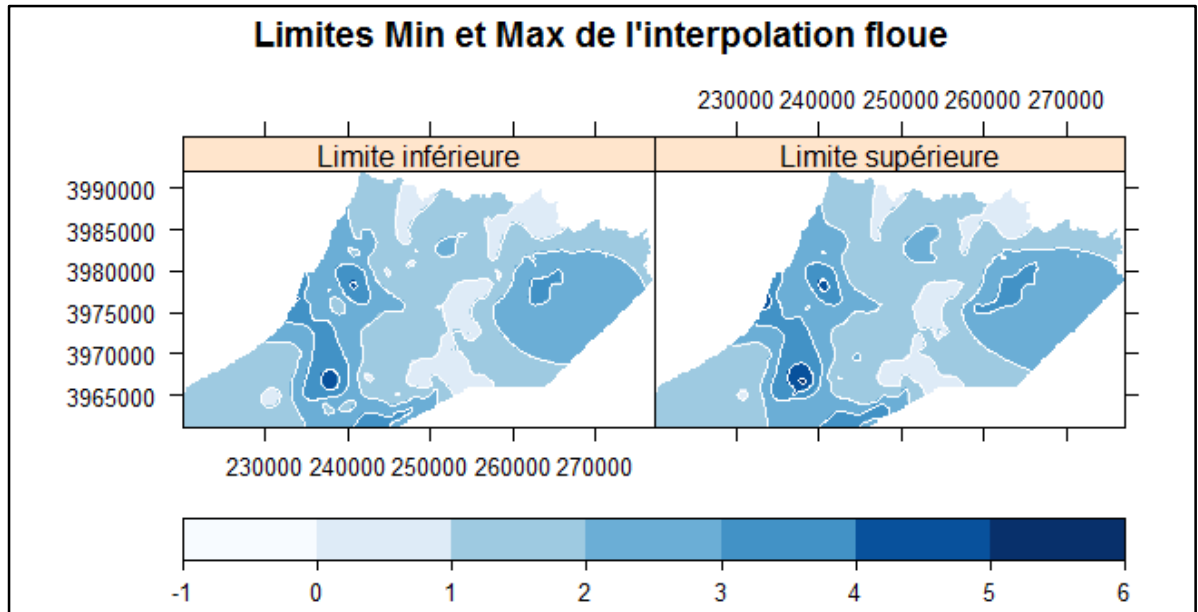


Figure 6. 27. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues des débits du plateau de Mostagnem.

La figure 6.28 représente la carte des largeurs des estimations floues (différence entre valeur maximale et valeur minimale) des débits sur tout le plateau de Mostagnem.

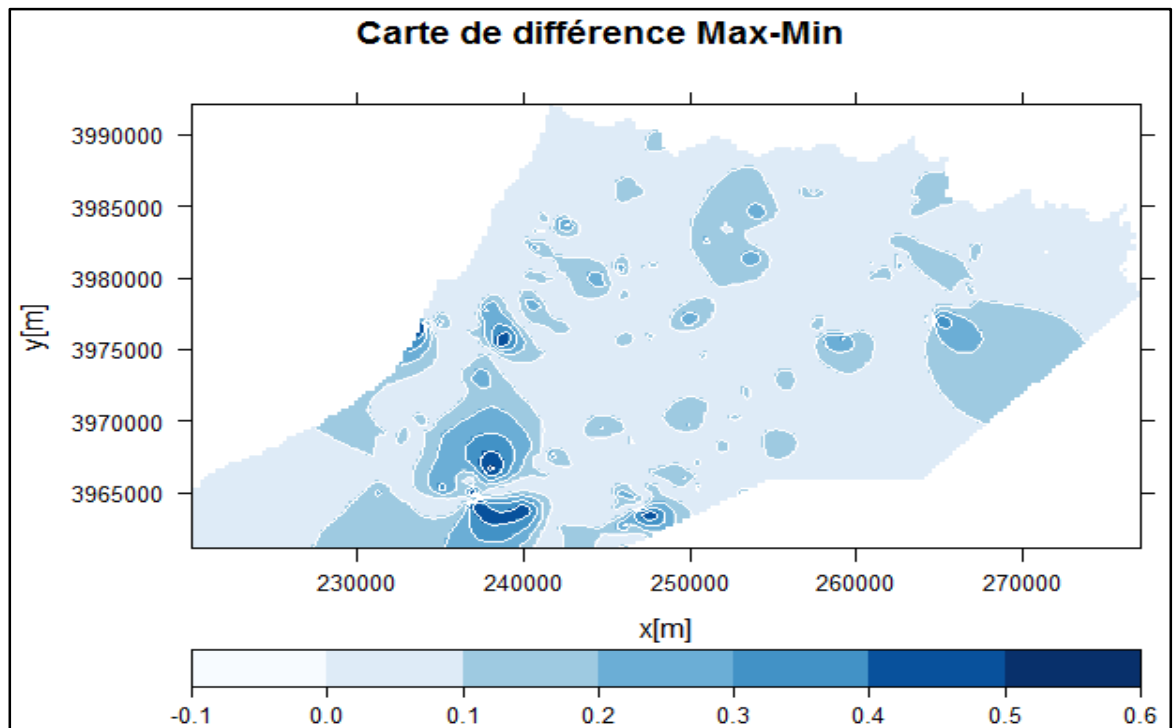


Figure 6. 28. Largeurs des estimations floues de $\bar{z}^0 - \underline{z}^0$ des débits du plateau de Mostagnem.

6.4 Interpolation floue du critère profondeur totale de la formation Aquifère

6.4.1 Définition

La profondeur totale de la formation aquifère correspond à la profondeur comprise entre le sol et le substratum de l'aquifère. La carte de profondeur totale du plateau de Mostaganem, a été, aussi, déterminée par interpolation floue en s'appuyant sur les données profondeur totale des forages et puits de la zone d'étude récoltées auprès des services du DRE relatives à l'année 2016.

6.4.2 Carte d'interpolation floue de la profondeur

La distribution spatiale des profondeurs est représentée sur la figure 6.29.

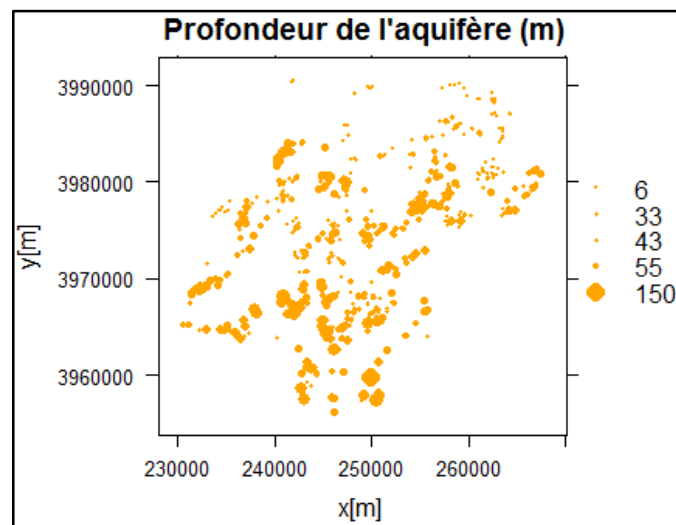


Figure 6. 29. Distribution spatiale des profondeurs sur le plateau de Mostaganem.

Pour l'établissement de la carte profondeur totale de l'aquifère du plateau de Mostaganem, le krigeage flou est également appliqué.

Après plusieurs itérations et essais de calcul, les paramètres du variogramme flou sont déterminés (voir tableau 6.3). Un variogramme flou sphérique est ajusté au variogramme empirique (voir figure 6.30).

Paramètres (m)	Valeur Minimale	Valeur modale	Valeur Maximale
Portée (r)	8500	7500	6000
Palier (Seuil) (s)	205	213	240
Effet de pépité (η)	55	80	95

Tableau 6. 3. Paramètres du variogramme flou sphérique du critère profondeur de l'aquifère

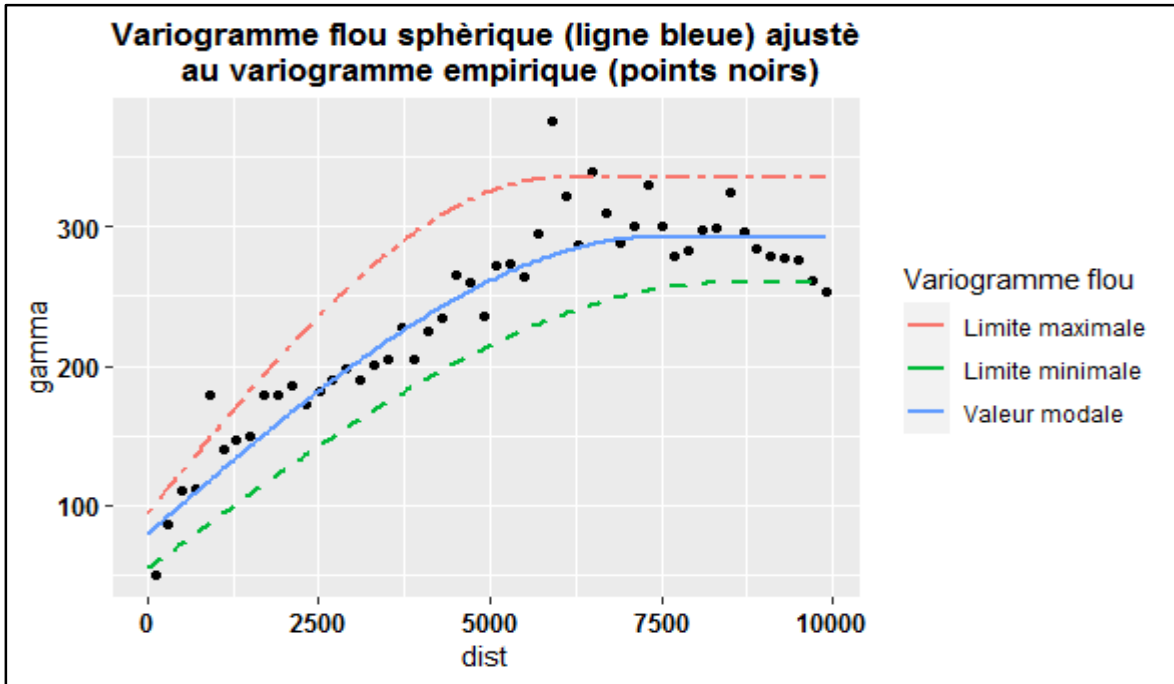


Figure 6. 30. Variogramme flou sphérique estimé (valeur minimale, modale et maximale) et ajusté à un variogramme empirique (points noirs) des débits.

La figure 6.31 représente le résultat du krigeage flou des profondeurs des forages et puits du plateau de Mostaganem en utilisant les valeurs modales des paramètres du variogramme flou et qui représentent les valeurs les plus probables du modèle d'interpolation. L'interpolation par krigeage flou est calculée sur une grille couvrant le plateau de Mostaganem avec une taille de cellule de 250m × 250m (exprimée en coordonnées projetées).

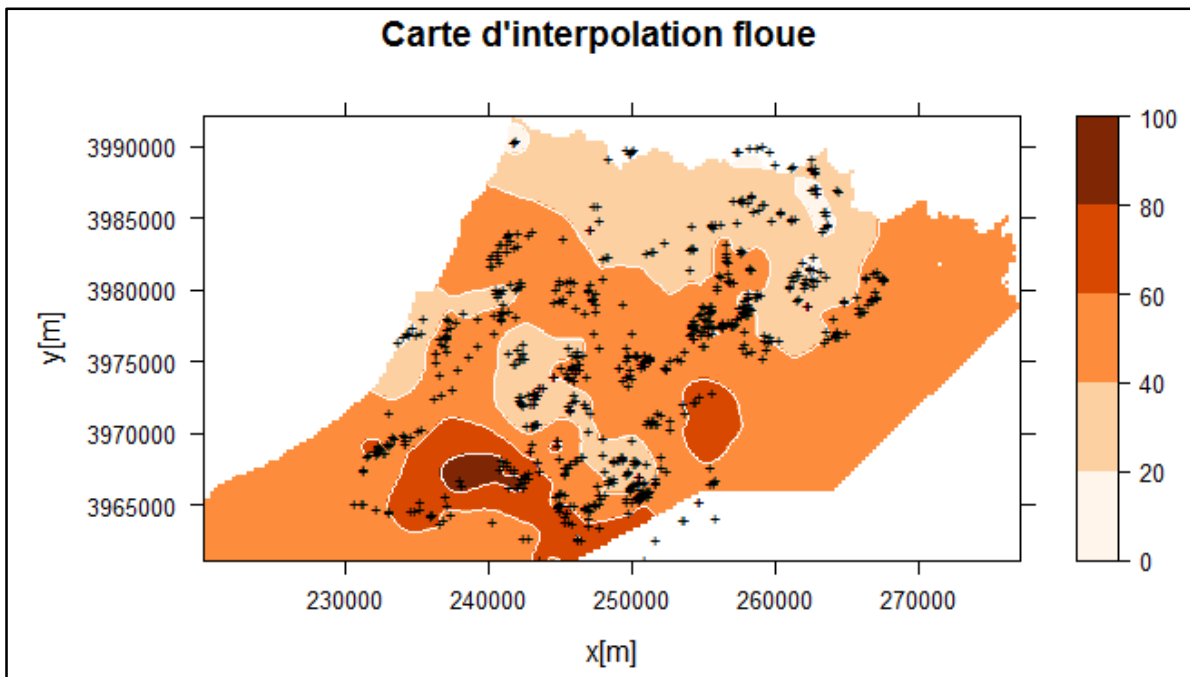


Figure 6. 31. Valeurs modales de la surface floue des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem avec les points de mesure (croix noirs).

6.4.3 Limites Min et Max de l'interpolation floue

La figure 6.32 représente les limites inférieures et supérieures des interpolations floues des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.

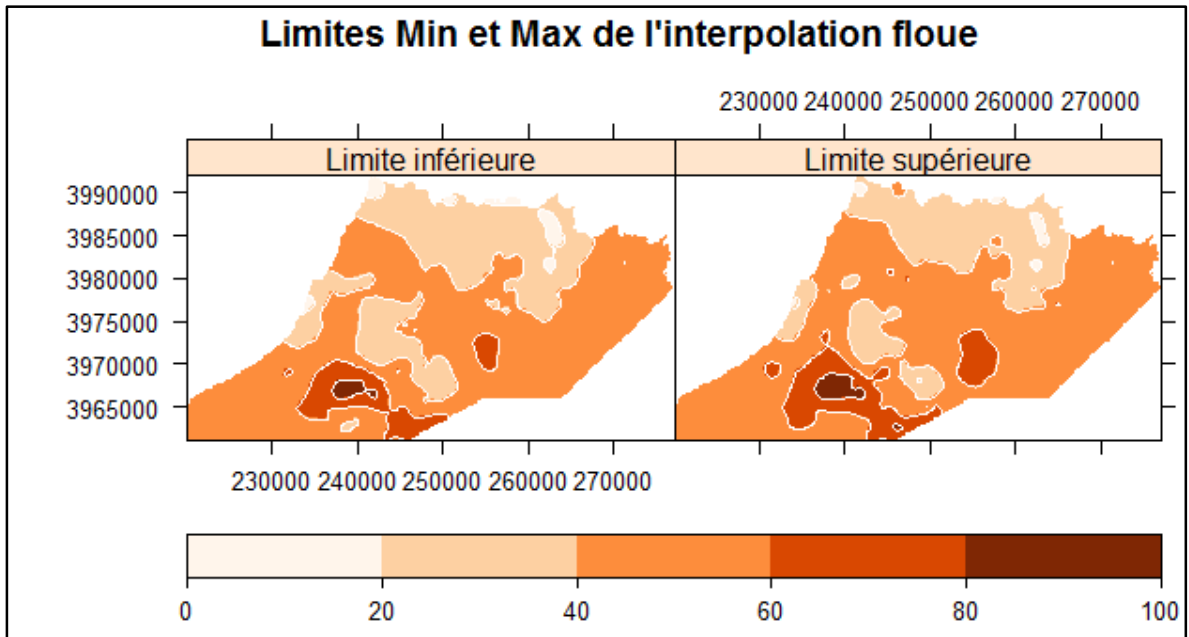


Figure 6. 32. Valeurs minimales (gauche) et maximales (droite) des estimations floues des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.

La figure 6.33 représente la carte des largeurs des estimations floues (max-min) des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.

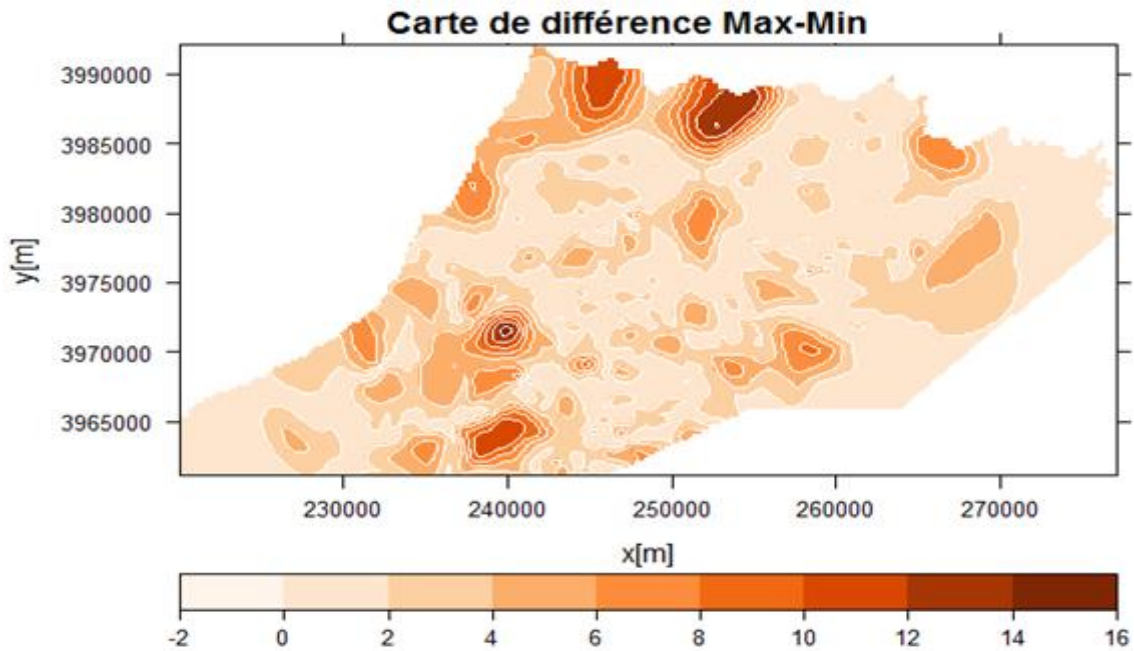


Figure 6. 33. Largeurs des estimations floues de $\bar{z}^0 - \underline{z}^0$ des profondeurs de l'aquifère du plateau de Mostaganem.

6.5 Conclusion

Le krigeage est la méthode d'estimation linéaire qui garantit une faible variance. Elle est aujourd'hui la méthode d'estimation des données spatiales la plus utilisée dans le domaine des géosciences.

Cependant, Pour pouvoir appliquer les méthodes de krigeage traditionnelles, il faut que les données et les paramètres du modèle de variogramme soient précis. Pour exploiter les données et les paramètres imprécis (flous), on utilise des méthodes de krigeage flou.

Les incertitudes qui pèsent sur les résultats du krigeage sont dues non seulement à la rareté et à l'imprécision possibles des mesures disponibles, mais aussi à la difficulté de mettre en relation les variogrammes empiriques et théoriques. Ces derniers sont souvent choisis par un expert qui s'appuie au moins autant sur son expérience dans le domaine à investiguer que sur les mesures elles-mêmes.

La prise en compte de l'incertitude sur les paramètres du variogramme rend la procédure de krigeage plus réelle et plus pertinente.

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation d'un variogramme flou ajusté au variogramme empirique permet une meilleure modélisation du phénomène étudié. D'un côté, l'emploi des nombres flous triangulaires, pour modéliser les paramètres du variogramme théorique, permet d'aboutir à une variance la plus petite possible à travers les paramètres modaux du variogramme et ainsi avoir une surface krigée qui représente au mieux la réalité. D'un autre côté, le variogramme flou permet à l'utilisateur de connaître son incertitude sur les dépendances spatiales dans les données. Les limites minimales et maximales lui fournissent la précision sur l'interpolation des données à chaque emplacement. Ce qui est assez important surtout s'il n'y a pas d'ajustement simple d'un variogramme théorique à un variogramme empirique.

Chapitre 7
Analyse SIG
& carte de sites potentiels

7.1 Introduction

On rappelle que le but de ce travail de recherche est de développer un Système d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) pour le choix du meilleur site d'implantation de forage de captage d'eau. Le SADS proposé consiste en une combinaison de Système d'Information Géographique (SIG) et d'une méthode multicritères floue. Plusieurs études intégrant le SIG et la logique floue ont été réalisées pour la prise de décision environnementale (Assimakopoulos et al., 2003, Reshmidevi et al., 2009, Al-abadi et al., 2017).

Ce chapitre consiste à présenter la première étape du SADS proposé. Elle porte sur l'utilisation des fonctionnalités qu'offre le logiciel SIG "ArcGis", pour la sélection d'un ensemble de sites potentiels, en se basant sur des critères géologiques et hydrologiques du plateau de Mostaganem.

7.2 Organigramme de l'approche SIG

Les SIG permettent la modélisation de l'information géographique comme un ensemble logique de couches ou de thèmes. Le logiciel SIG "ArcGIS" est utilisé, dans cette étude, pour élaborer une carte identifiant des sites potentiels de forages sur le plateau de Mostaganem. La figure 7.1 illustre les étapes de l'approche SIG adoptée.

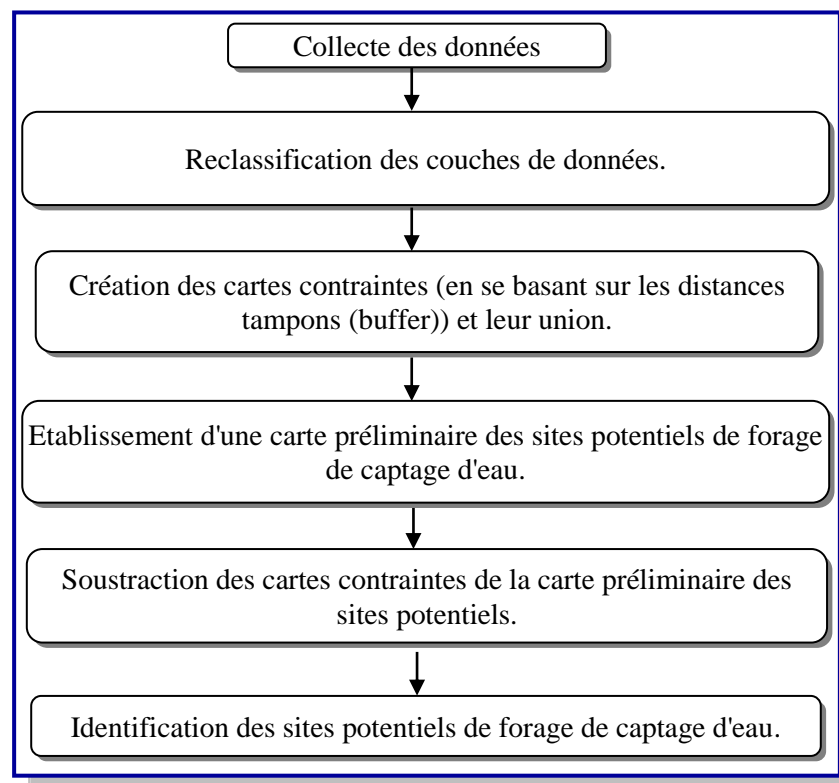


Figure 7. 1. Organigramme de l'approche SIG.

7.3 Collecte des données

Avant d'entamer l'approche SIG, il est primordial de définir les principaux critères qui interviennent dans l'établissement du SADS. La recherche bibliographique menée [(Diallo S., 2007), (Lachassagne P. et al., 2000), (Jeanneau J. et al., 2004), (Coulibaly T., 2004), (CICR, 2012), (Myrand D., et al., 2008), (Danert, K. 2009)], a permis d'identifier les critères suivants: le rabattement de la nappe, la transmissivité, le coefficient d'emménagement, le débit, la profondeur totale de l'aquifère, la vulnérabilité à la pollution, la recharge potentielle de la nappe et la qualité des eaux souterraines. Un aperçu général sur ces critères est donné dans ce qui suit.

Parmi les critères cités ci-dessus, on distingue deux types de critères:

- Critères numérisés: Il s'agit des paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emménagement du plateau de Mostagnem) fournis par l'ANRH ou issus d'études antérieures faites sur le plateau de Mostaganem.
- Critères étudiés: Plusieurs critères ont fait l'objet d'études détaillées. Quant aux critères vulnérabilité, recharge potentielle et qualité des eaux souterraines, ils font l'objet d'études rapportées en annexes.

7.3.1 Paramètres hydrodynamiques

La fonction de l'aquifère est de stocker les eaux souterraines et de réguler le stockage et la libération de l'eau. Les paramètres hydrodynamiques sont des indicateurs qui définissent la capacité d'un aquifère à récupérer et à fournir de l'eau. Ils sont essentiels pour comprendre les aquifères et la quantité d'eau qui peut être donnée par les puits. (<http://sigessn.brgm.fr>).

La transmissivité, la perméabilité et le coefficient de d'emménagement sont les principaux paramètres hydrodynamiques contrôlant l'écoulement des eaux souterraines. Certains paramètres sont essentiels pour comprendre le débit récupérable d'un forage. Elles peuvent être déterminées en laboratoire ou sur le terrain, notamment lors d'essais de pompage en puits.

7.3.1.1 Transmissivité de la nappe du plateau de Mostaganem

La transmissivité (T en m^2/s) est le paramètre qui contrôle le débit (mesuré dans le sens normal à l'écoulement) s'écoulant par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu et par unité de gradient hydraulique (figure 7.2), (<http://sigessn.brgm.fr>).

La productivité d'un forage dans un aquifère, c'est-à-dire le débit capté par un forage, est liée au coefficient de perméabilité (k en m/s) et à l'épaisseur mouillée (e) de l'aquifère.

$$\text{Transmissivité } 'T'(m^2/s) = \text{Perméabilité } 'k'(m/s) * \text{Epaisseur } 'e' (m)$$

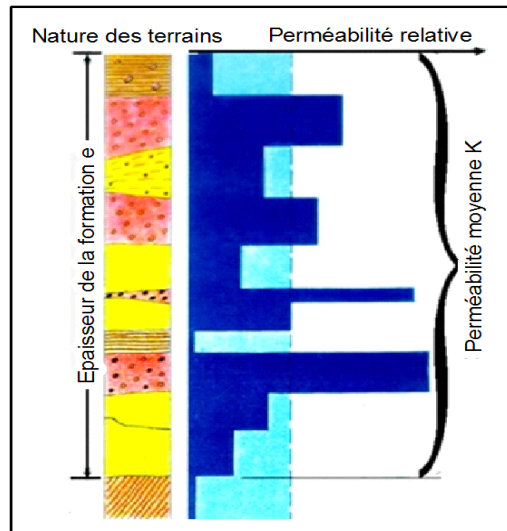


Figure 7. 2. Transmissivité de la formation aquifère

Dans le cas de notre zone d'étude (Plateau de Mostaganem), plusieurs données relatives à la transmissivité sont présentées, il s'agit de :

1. La carte de transmissivité établie par Y. LEROLLE à la suite d'une modélisation mathématique du plateau, en novembre 1973 (voir figure 7.3). La carte des transmissivités de Lerolle est celle qui figure dans la notice explicative de la carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem (DEMRH, 1978).
2. La carte de transmissivité a été extraite de la carte hydrogéologique interprétative de l'ANRH (ANRH, 2009). Cette dernière a été réalisée par L'ANRH et le bureau d'étude Energo projekt Hidroinzenjering S.A (Belgrad-Serbie) à l'échelle 1/200000. Elle est établie sur la base des données disponibles à l'ANRH (cartes topographiques, géologiques, études géophysiques, hydrogéologiques et hydrochimiques) et des données recueillies auprès d'institutions nationales INCT, ORGM, ONM, ANBT). Les techniques de la télédétection ont été également utilisées pour pallier à l'absence d'information sur les zones non couvertes par les cartes géologiques.

Faute de données relatives aux essais de pompage de la zone d'étude, la numérisation des champs de transmissivité par le logiciel ArcGis à partir de la carte hydrogéologique de l'ANRH (ANRH, 2009), nous a permis d'obtenir la carte de transmissivité utilisée dans le cadre de cette thèse (voir figure 7.4).

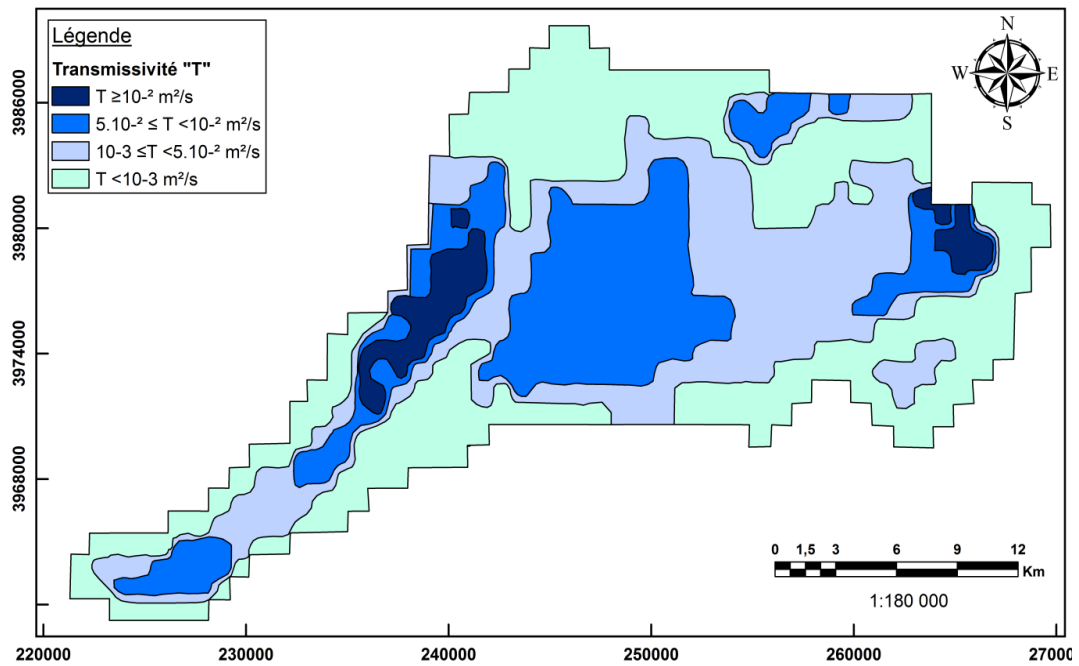


Figure 7. 3. Carte de transmissivité de Y. LEROLLE issue de la carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem (Lerolle, 1973).

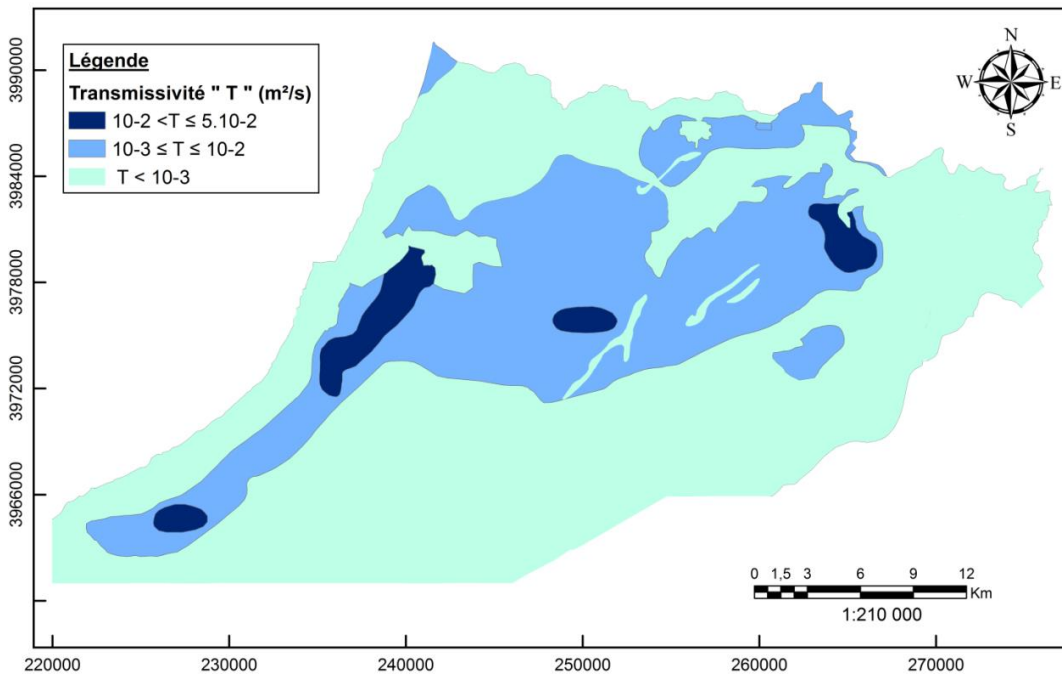


Figure 7. 4. Carte de transmissivité. (Source : ANRH, 2009).

Les deux cartes de transmissivité, ainsi présentées, sont globalement assez similaires, la transmissivité sur le plateau de Mostaganem varie donc, entre 10^{-4} et 10^{-2} m^2/s avec une transmissivité moyenne d'environ 10^{-3} m^2/s .

7.3.1.2 Coefficient d'emmagasinement de la nappe

Le coefficient d'emmagasinement (S) indique la quantité d'eau libérée sous l'effet d'une baisse du niveau d'eau. Il détermine le stockage des eaux souterraines mobiles dans les vides du

réservoir. Il indique plus précisément la quantité d'eau qui peut être fournie par un forage et se détermine lors de pompages d'essai.

Dans un aquifère libre, comme c'est le cas de la nappe du Plateau de Mostaganem, l'eau est libérée par l'action des forces de gravité (drainage). Le coefficient d'emmagasinement est équivalent à la porosité efficace. Les valeurs usuelles vont de 1% pour certains limons et jusqu'à 30 - 40% pour des alluvions grossières.

D'après le modèle mathématique de Lerolle Y. (Lerolle Y., 1973) (figure 7.5), le coefficient l'emmagasinement sur le plateau de Mostaganem varie principalement entre 2 et 20 %.

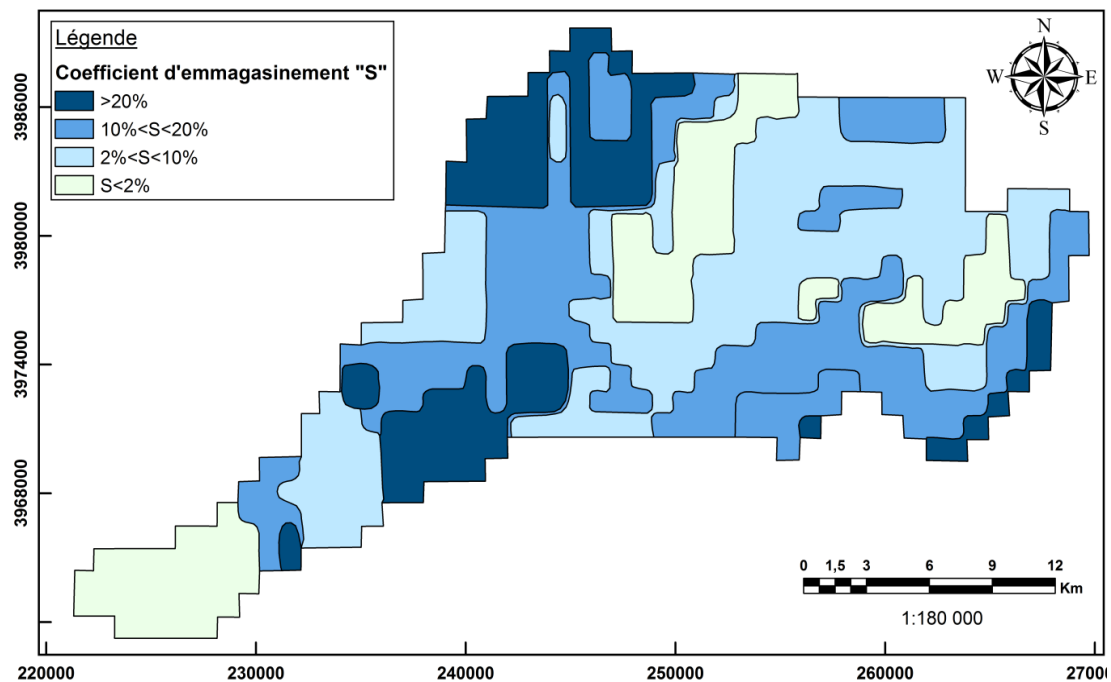


Figure 7. 5. Carte du coefficient d'emmagasinement du plateau de Mostaganem (selon le modèle mathématique de Lerolle Y., 1973)

Selon la notice explicative (DEMRH 1978), les cartes de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement (figure 7.4 et 7.5) sont obtenues après calage sur le modèle mathématique des données des essais de pompages, de la géophysique et de la géologie.

7.3.1.3 Perméabilité de la nappe du plateau de Mostaganem

1. Définition

La perméabilité c'est la capacité des roches à laisser traverser les eaux, sous pression (ou gradient hydraulique). Plus la perméabilité est grande, plus l'eau s'écoulera rapidement. La porosité de la roche (vides interconnectés) explique cette perméabilité. Selon le type de porosité, il existe une perméabilité petite (circulation dans les pores) et une perméabilité grande (circulation dans les fissures, fractures, karsts...). (<http://sigessn.brgm.fr>).

2. Coefficient de perméabilité (de Darcy)

Différentes expériences sur le déplacement de l'eau dans un milieu poreux ont été réalisées par Henri Darcy en 1956. Ainsi, il a pu déterminer des lois régissant l'écoulement de l'eau à travers le sable. A l'heure actuelle, on utilise toujours les équations de Darcy pour le calcul de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

Henri Darcy a déterminé un coefficient de perméabilité (k en m/s), en fonction du milieu poreux, qui correspond à la quantité d'eau qui imprègne une surface en un temps donné.

3. Quelques ordres de grandeurs des coefficients de perméabilité

La différenciation entre les roches perméables et les roches imperméables a arbitrairement été choisie à 10^{-9} m/s. Malgré leur forte porosité globale, les argiles sont considérées comme imperméables en raison de leurs petits pores non interconnectés qui lui attribuent une très faible porosité efficace.

Roche	Coefficient de perméabilité (http://sigessn.brgm.fr)
Graviers	10^{-2} m/s
Sables	10^{-2} à 10^{-5} m/s
Craie	10^{-3} à 10^{-5} m/s
Argiles	10^{-9} à 10^{-13} m/s

Tableau 7. 1. Quelques ordres de grandeurs de coefficients de perméabilité

4. Carte de perméabilité du plateau de Mostaganem

La carte de perméabilité utilisée dans le cadre de cette thèse a été numérisée à partir de la carte hydrogéologique de l'ANRH (ANRH, 2006). Cette carte est présentée dans la figure 7.6. D'après cette carte, on distingue trois (3) classes de perméabilité sur le plateau de Mostaganem (bonne, moyenne et faible).

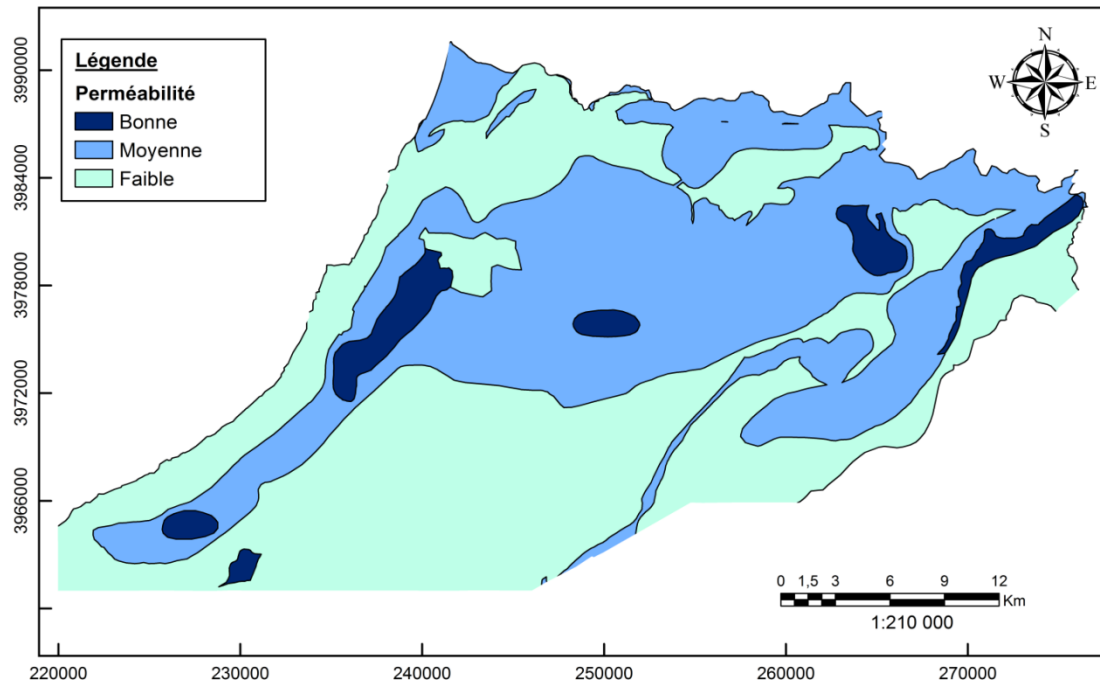


Figure 7. 6. Carte de perméabilité du plateau de Mostaganem. (Source : ANRH, 2006)

7.3.2 Rabattement de la nappe

La surveillance du niveau piézométrique de la nappe phréatique est importante, dans la mesure où l'implantation exagérée de points de captage d'eau dans une zone plutôt qu'une autre conduit à un risque de rabattement du niveau piézométrique dans cette zone, et d'en produire donc des forages échoués. Le critère rabattement est un critère prépondérant qui doit être pris en considération dans le choix des sites potentiels de forage de captage d'eau. Le rabattement de la nappe étant issu de la piézométrie, cette dernière fait l'objet d'une étude détaillée basée sur la logique floue afin d'obtenir plus de précision sur les résultats obtenus et tenir compte de l'incertitude de l'interpolation. Cette étude est détaillée au chapitre 6.

7.3.3 Débit

L'aquifère doit fournir un débit suffisant pour un forage d'irrigation ou d'adduction en eau potable. Ces informations sont souvent disponibles dans des documents existants (notamment dans des fichiers qui recensent les points d'eau et forages existants) où pourraient être tirées des pompages d'essai.

Pour cette étude, la carte relative au critère débit est établie par krigeage flou. Elle est présentée en section 6.3 du chapitre 6.

7.3.4 Profondeur de l'aquifère

Il convient de tenir compte de la profondeur de l'aquifère dans le choix d'un site de forage de captage d'eau. Plus cette profondeur est petite, plus le réalisateur du forage a tendance à

minimiser le coût de cette réalisation. La carte profondeur de l'aquifère est établie par interpolation floue. Plus de détails sont présentés au chapitre 6, section 6.4.

7.3.5 Recharge

Même si un forage peut fournir un débit important à court ou moyen terme, si l'eau souterraine n'est pas régulièrement renouvelée par l'infiltration des eaux de pluie ou du flux d'une rivière, ce débit ne sera pas maintenu à long terme. Il est donc important d'évaluer la recharge de la nappe et les fluctuations dans le temps. Ce critère a fait l'objet d'une étude détaillée rapportée en annexe A.

7.3.6 Vulnérabilité

La vulnérabilité des eaux souterraines fait référence à la pollution qui les menace. La notion de vulnérabilité dépend principalement des conditions physiographiques et hydrogéologiques.

Le critère vulnérabilité est établi grâce à une étude détaillée qui est rapportée en annexe B.

7.3.7 Qualité de l'eau

Les différents usages de l'eau imposent différentes normes de sa qualité. L'eau destinée à l'usage domestique ne doit contenir aucun agent pathogène (véhiculés par les excréments humains) ni d'éléments chimiques toxiques à très faible concentration, tel que l'arsenic ou le fluor. Si l'eau souterraine est utilisée à des fins d'irrigation, sa salinité doit être contrôlée. Par conséquent, l'implantation des forages doit tenir compte des connaissances attestant de l'existence de ces substances non désirables. L'eau du forage doit être analysée et les résultats comparés aux normes nationales ou internationales. Une étude détaillée de ce critère est présentée en annexe C.

NB: Tous les critères sont utilisés dans l'approche SIG, sauf le critère 'qualité de l'eau'. Il servira dans l'étape d'analyse multicritères floues (MCFAD) qui permet la notation et le classement des sites potentiels. Ceci est dû à la difficulté d'établir une carte (shape file) qui définit la répartition spatiale de la qualité de l'eau sur le plateau de Mostaganem.

7.3.8 Sources potentielles de contamination

Il est essentiel d'éviter les sources de contamination des points d'eau comme : les latrines, les fosses septiques, les enclos à bétail, les chemins ferroviaires, les stations de service, les lignes de pipes ou gaz, les décharges d'ordures, etc. Il peut exister des normes nationales en matière de distance minimale à respecter autour d'un point d'eau ou des zones de protection de l'eau souterraine. Des cartes de contraintes ont été établies dans ce sens (voir plus de détails à la section 7.4.2 du présent chapitre).

7.4 Reclassification des couches de données

Avant de procéder à la superposition des différentes cartes critères, une reclassification a été effectuée, pour certains critères, dans le but d'éliminer les zones défavorables pour le captage d'eau et réduire ainsi le nombre de classes à prendre en considération.

Les résultats de la reclassification sont présentés dans les figures 7.7, 7.8, 7.9 et 7.10.

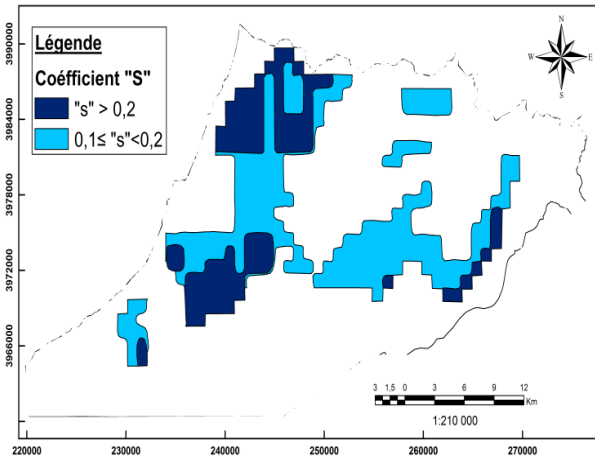


Figure 7.7. Carte de coefficient "S" reclassé.

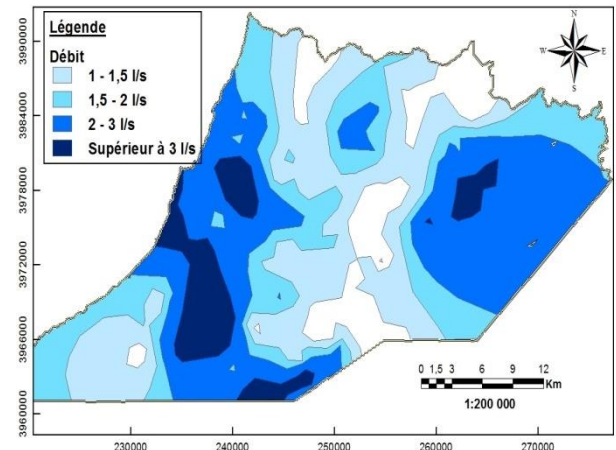


Figure 7.8. Carte de débit reclassé

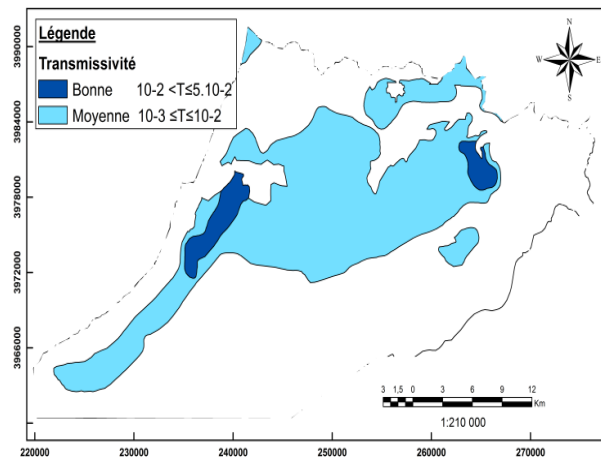


Figure 7.9. Carte de transmissivité reclassée

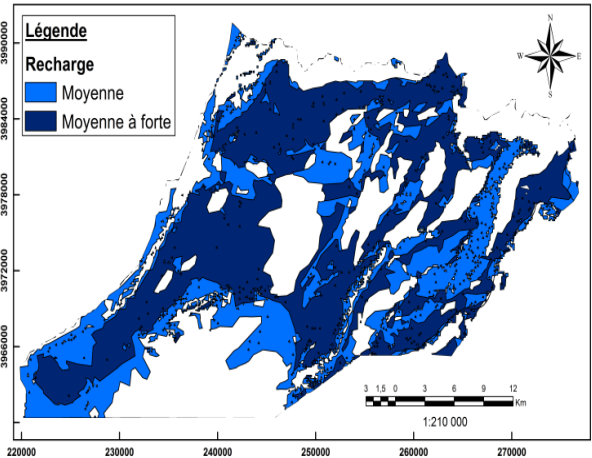


Figure 7.10. Carte de la recharge potentielle reclassée

7.5 Création des cartes de contraintes et zones tampons

Dans la procédure de sélection d'un site potentiel pour le forage d'eau, il faut également tenir compte des contraintes de proximité, à savoir les distances minimales à respecter autour des canalisations, des réseaux routiers, des stations-service, etc. Les distances de proximité autour des points d'eau existants tels que les forages existants, les puits, les sources et les cours d'eau ont également été prises en compte, dans cette étude, afin d'éviter toute interférence avec les exutoires naturels des aquifères pouvant entraîner leur rabattement ou leur dessèchement.

Selon (Guide méthodologique de forage .., 2012) et sur la base de discussions menées avec les experts de l'ANRH, plusieurs distances tampons (buffer) ont été fixées pour les contraintes de proximité (voir tableau 7.2). Les différentes cartes de contraintes réalisées dans cette étude sont: une carte de contraintes de cours d'eau (points de forage existants, sources existantes, puits existants, oued ou rivière), une carte de contraintes relative au réseau routier (route, chemin de fer), une carte de contraintes relative aux zones à risque (usine, station-service) et une carte de contrainte relative au pipeline (Voir les différentes cartes contraintes en annexe F).

Les cartes de contraintes obtenues, sont ensuite superposées comme le montre la figure 7.11.

Critères	Zones tampons (m)
Point de forage existant	1000 (rayon)
Point de source existant	1000 (rayon)
Stations de service	1000 (rayon)
Cour d'eau (oueds)	200 (de part et d'autre de l'axe)
Pipeline	30 (de part et d'autre de l'axe)
Chemin ferroviaire et route	25 (de part et d'autre de l'axe)

Tableau 7. 2. Critères de proximité et zones tampons

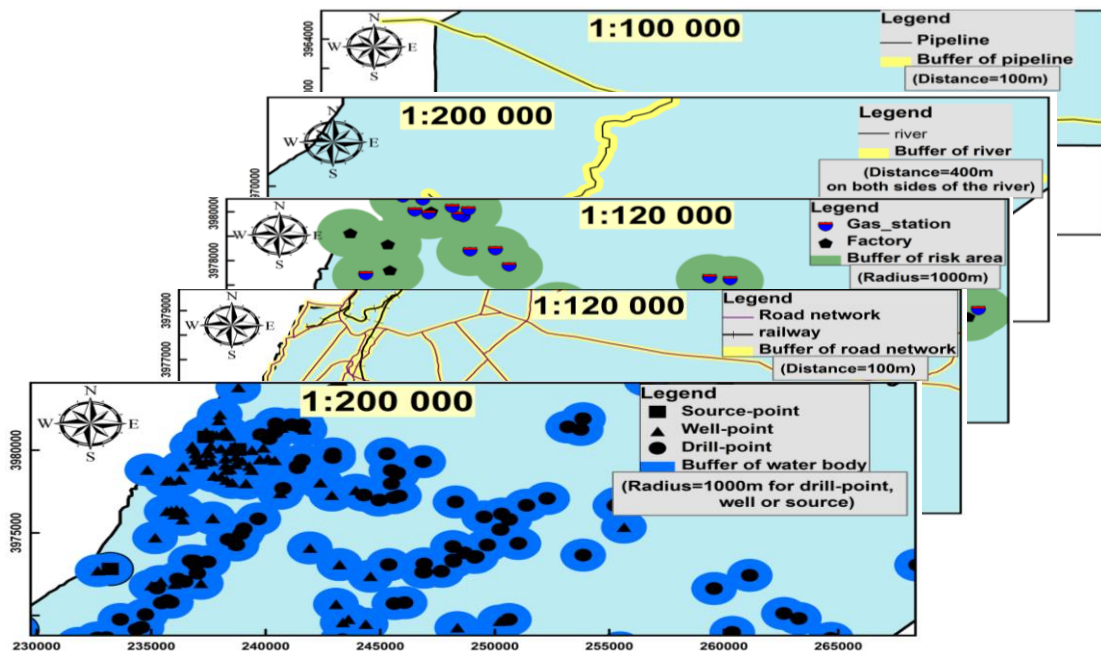


Figure 7. 11. Cartes de contraintes et zones tampons.

7.6 Carte préliminaire de sites potentiels

La superposition des cartes critères reclassés (recharges, débit, transmissivité et coefficient d'emmagasinement), ainsi que les cartes des critères (Rabattement, profondeur totale de

l'aquifère, vulnérabilité de la nappe à la pollution), a permis d'obtenir une carte préliminaire de sites potentiels (voir figure 7.12).

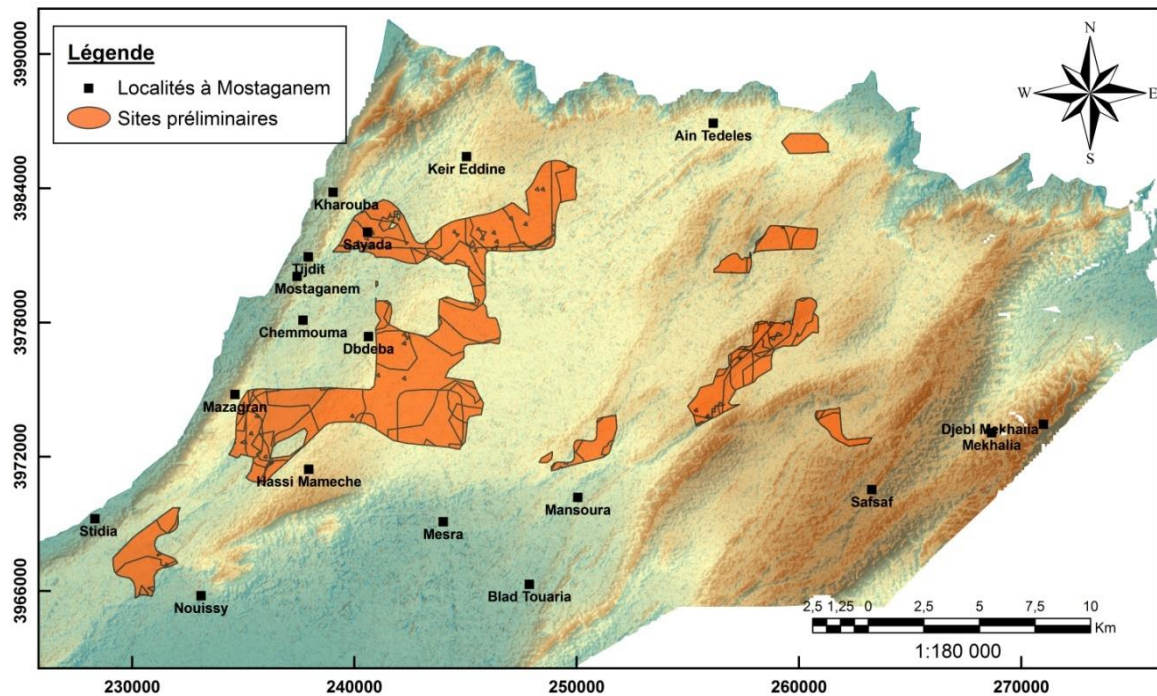


Figure 7. 12. Carte préliminaire de sites potentiels dans le plateau de Mostaganem

7.7 Carte des sites potentiels de captage d'eau et sa table attributive

Cette dernière étape de la méthodologie SIG permet l'extraction des différents sites potentiels de forage de captage d'eau, à partir de la carte préliminaire et en tenant compte des zones tampons et des cartes de contraintes qui en résultent. La soustraction des cartes de contraintes de la carte préliminaire a permis d'identifier les zones (ou sites) potentielles de captage d'eau (figure 7.13). Dix (10) sites potentiels, répartis sur le plateau de Mostaganem, sont obtenus.

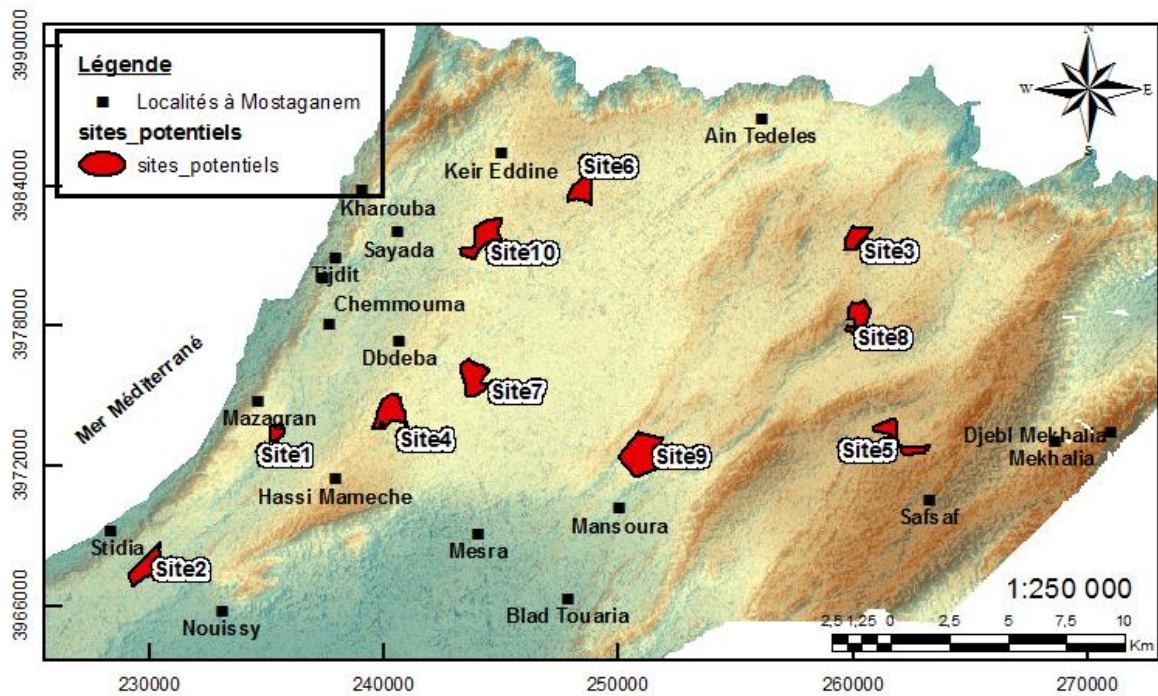


Figure 7. 13. Carte de sites potentiels de forages de captage d'eau

L'ensemble des sites potentiels se constitue principalement de trois grandes zones de captage:

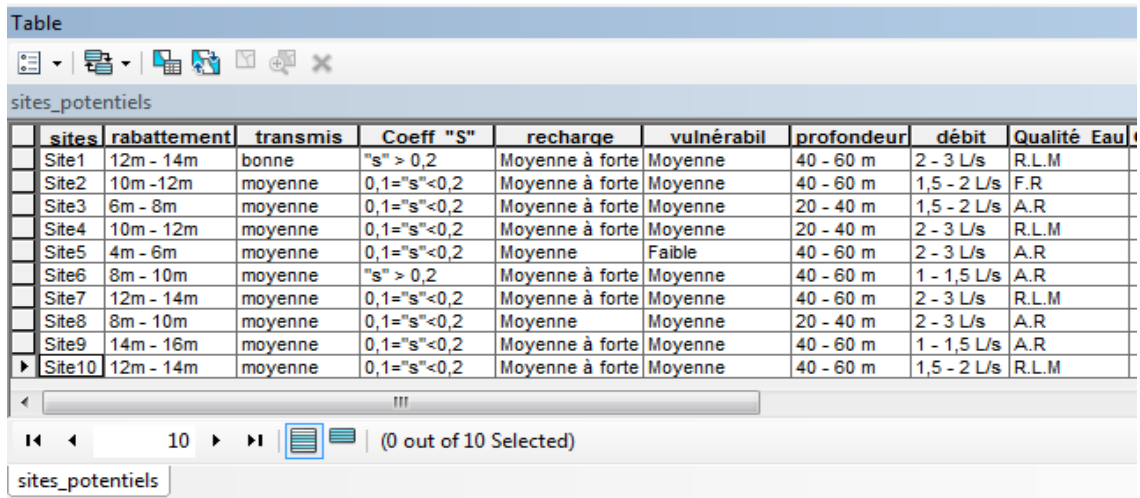
- Zone 1 : constituée des sites 3, 5, et 8. Cette zone est située à l'Est du plateau, au Nord de la localité de SafSaf et à l'Ouest de djebel MeKhalia.
- Zone 2 : constituée des sites 6 et 10. Cette zone est située au nord-Ouest du plateau à l'Est de Sayada et au Sud-Est de Kheire Eddine.
- Zone 3 : constituée des sites: 1, 2, 4, 7 et 9. Ces sites se situent au Sud du plateau; à l'Est de Debdeba, Mazagran et Stidia.

Selon les cartes des critères et l'approche SIG utilisée dans la première partie de l'étude, toutes les évaluations des sites potentiels par rapport aux critères sont vagues (ex: vulnérabilité faible, recharge moyenne) ou imprécises (ex: Coeff" s ">0,2, Débit>3l/s, Profondeur de l'aquifère entre 40 à 60m).

A titre d'exemple, les valeurs suivantes sont obtenues pour le Site 1:

- Transmissivité: bonne,
- Coefficient d'emmagasinement " S ">0,2,
- Rabattement de la nappe est d'environ 12 à 14m,
- Profondeur de l'aquifère: entre 40 et 60m,
- Débit: entre 2 à 3L/s,
- Recharge: Moyenne à forte,
- Vulnérabilité: Moyenne

La table attributaire, présentée dans la figure 7.14, donne les valeurs des évaluations des 10 sites potentiels obtenus au cours de cette première phase.



The screenshot shows a table window titled 'Table' with a toolbar at the top. Below the toolbar, the table name 'sites_potentiels' is displayed. The table contains 10 rows of data, each representing a site. The columns are: sites, rabattement, transmis, Coeff "S", recharge, vulnérabil, profondeur, débit, and Qualité Eau. The data is as follows:

sites	rabattement	transmis	Coeff "S"	recharge	vulnérabil	profondeur	débit	Qualité Eau
Site1	12m - 14m	bonne	"s" > 0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	2 - 3 L/s	R.L.M
Site2	10m - 12m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	1,5 - 2 L/s	F.R
Site3	6m - 8m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	20 - 40 m	1,5 - 2 L/s	A.R
Site4	10m - 12m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	20 - 40 m	2 - 3 L/s	R.L.M
Site5	4m - 6m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne	Faible	40 - 60 m	2 - 3 L/s	A.R
Site6	8m - 10m	moyenne	"s" > 0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	1 - 1,5 L/s	A.R
Site7	12m - 14m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	2 - 3 L/s	R.L.M
Site8	8m - 10m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne	Moyenne	20 - 40 m	2 - 3 L/s	A.R
Site9	14m - 16m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	1 - 1,5 L/s	A.R
Site10	12m - 14m	moyenne	0,1="s"<0,2	Moyenne à forte	Moyenne	40 - 60 m	1,5 - 2 L/s	R.L.M

Below the table, there is a navigation bar with a scroll bar and a selection indicator showing '(0 out of 10 Selected)'. The table name 'sites_potentiels' is also visible in a small box at the bottom left of the window.

Figure 7. 14. Attributs relatifs à la carte des sites potentiels.

7.8 Conclusion

La démarche SIG, adoptée dans cette partie de l'étude, nous a permis l'établissement d'une carte de sites potentiels de forages de captage d'eau sur la plateau de Mostaganem. Un ensemble de 10 sites potentiels a été déterminé.

Les évaluations des sites par rapport aux critères impliqués dans cette démarche, reflètent d'un côté, un aspect incertain, imprécis et vague et d'un autre côté, un aspect multi-critère qui ne permet pas le rangement des sites potentiels du meilleur au moins bon.

Chapitre 8

Méthode multicritère floue (MCFAD) & carte décisionnelle

8.1 Introduction

Les résultats de la première étape du SADS sont insuffisants pour choisir le meilleur site parmi l'ensemble des sites déterminés. Les évaluations de ces sites par rapport aux différents critères étant vagues, leur modélisation et agrégation par une méthode multicritère floue, se sont vite imposées.

Ainsi, une méthode Multi_Critère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD) est développée dans la deuxième étape du SADS. Cette méthode, basée sur le concept de variables linguistiques et sous-ensembles flous triangulaires, est programmée sous l'environnement MATLAB.

8.2 Organigramme de la méthode Multi-Critère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD)

L'objectif de la méthode MCFAD est de sélectionner le meilleur site de captage d'eau, parmi les sites potentiels déterminés par l'approche SIG dans la première étape du SADS.

La méthode MCFAD est basée sur une division du processus de décision en une structure hiérarchique avec deux niveaux distincts. Le premier niveau consiste à évaluer les différents sites potentiels par rapport à chaque critère de décision. Le deuxième niveau consiste à évaluer les poids des critères. Le lien entre les alternatives et les différents critères est présenté dans la figure 8.1.

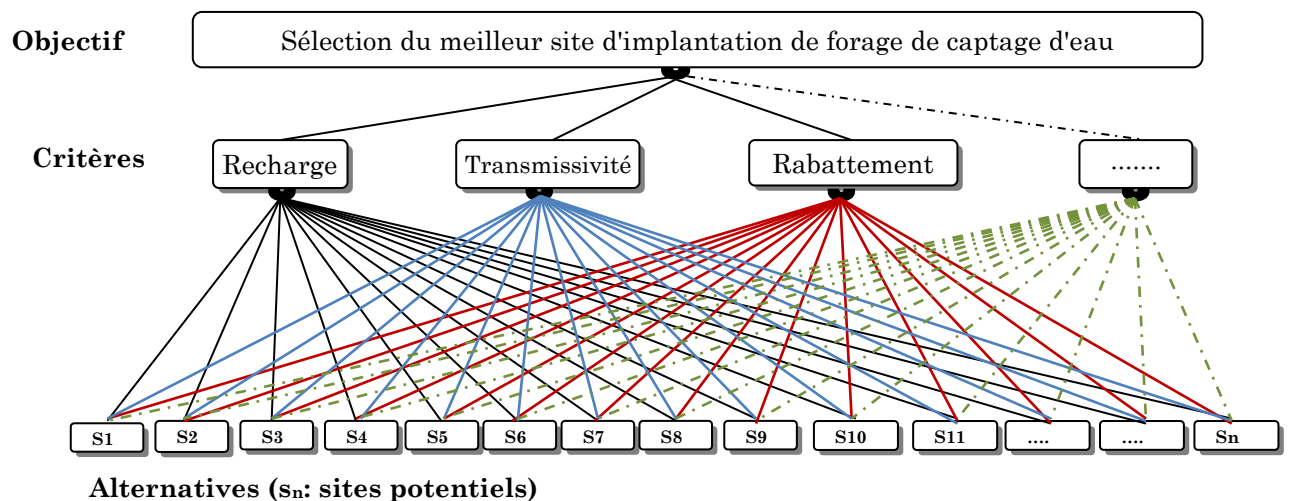


Figure 8. 1. Description du processus de prise de décision.

La méthode MCFAD utilisée repose sur l'emploi des variables linguistiques et les nombres flous triangulaires pour la modélisation et l'agrégation des évaluations floues obtenues avec l'analyse SIG. Par conséquent, les notations des sites potentiels par rapport à chaque critère, ainsi que les poids des critères sont exprimés par les experts du domaine sous forme de nombres flous triangulaires.

Par l'utilisation d'opérateurs flous moyens, l'agrégation des évaluations des experts permet d'obtenir un indice de pertinence flou " F_i " propre à chaque site potentiel (Chang et Chen, 1994). Ensuite, la méthode de classement du nombre flou triangulaire développée dans Chang et Chen (1994) est appliquée pour classer les indices " F_i " des sites potentiels. La Figure 8.2 récapitule les étapes de la méthode MCFAD pour sélectionner les sites potentiels les plus appropriés pour le forage de captage d'eau.

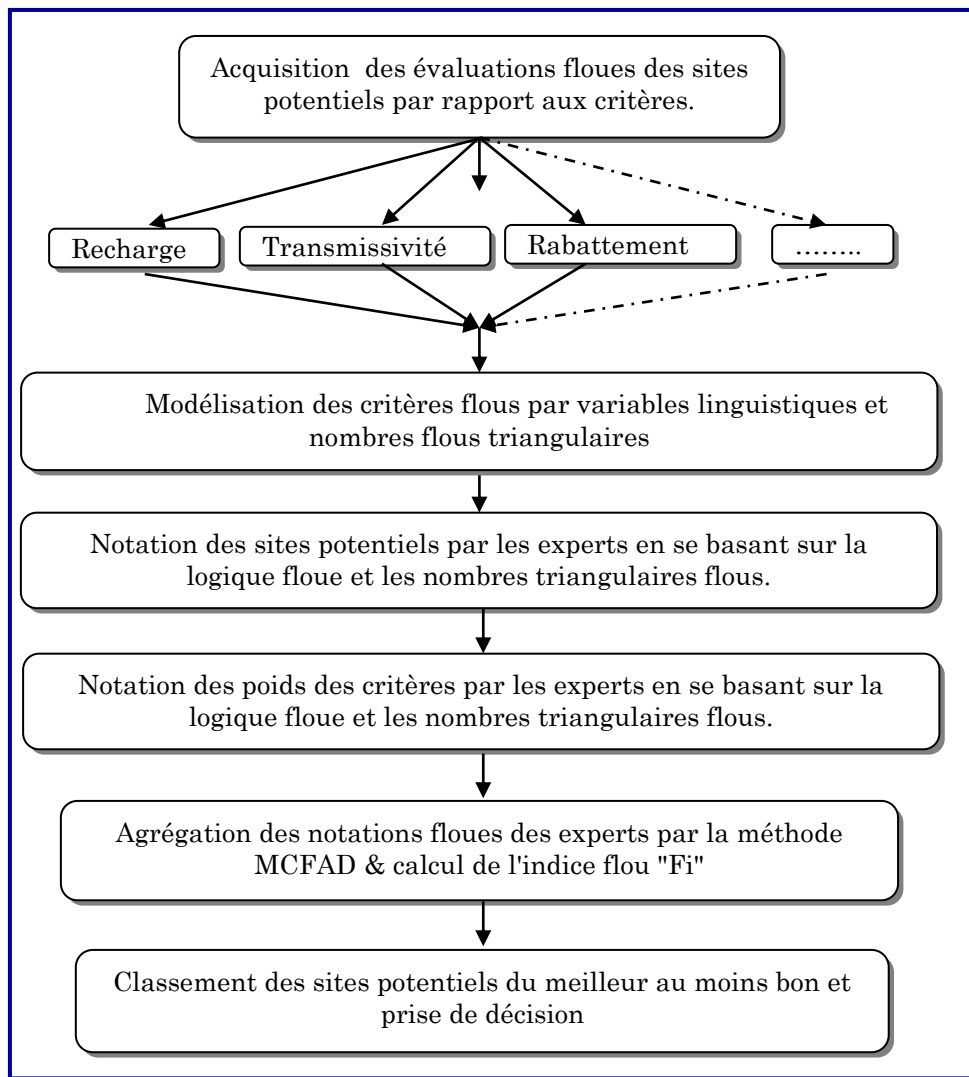


Figure 8. 2. Organigramme de la méthode MCFAD.

8.2.1 Modélisation des critères flous par variables linguistiques et nombres flous

La modélisation des différents critères à caractère vague est possible par l'application du principe de la logique floue. En effet, l'usage des variables linguistiques et les nombres flous triangulaires, pour modéliser la subjectivité et l'imprécision dans les limites des classes, est adopté dans cette deuxième phase du SADS pour faciliter le classement des sites potentiels et aider à la prise de décision. Cette modélisation est faite après concertation avec les spécialistes du domaine. Chaque critère est modélisé sous forme de variable linguistique, qui est décomposée

en sous ensembles flous triangulaires. Chaque ensemble flou triangulaire est présenté par sa fonction d'appartenance.

- La modélisation du critère vulnérabilité est traduite sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "vulnérabilité", comme indiqué dans la figure 8.3.

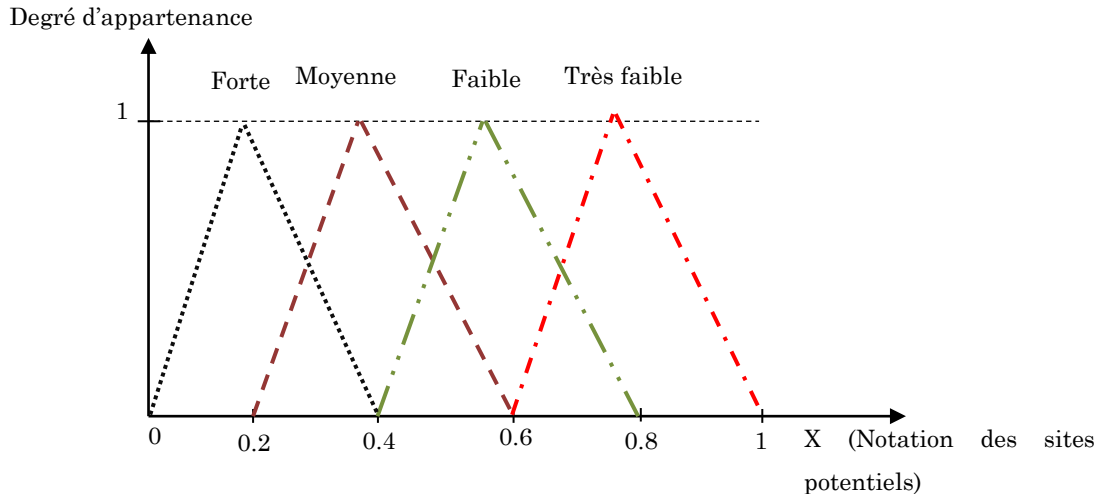


Figure 8. 3. Modélisation de la variable linguistique (V, X, T_V)

Avec: V = vulnérabilité, X = R⁺ (L'ensemble des nombres réels positifs), T_V (Les sous-ensembles triangulaires flous) = {Très faible, Faible, Moyenne, Forte}.

Les fonctions d'appartenances présentées ci-dessous, sont des fonctions d'appartenance typique de chaque critère.

- La modélisation du critère rabatement est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "rabatement", comme indiqué dans la figure 8.4.

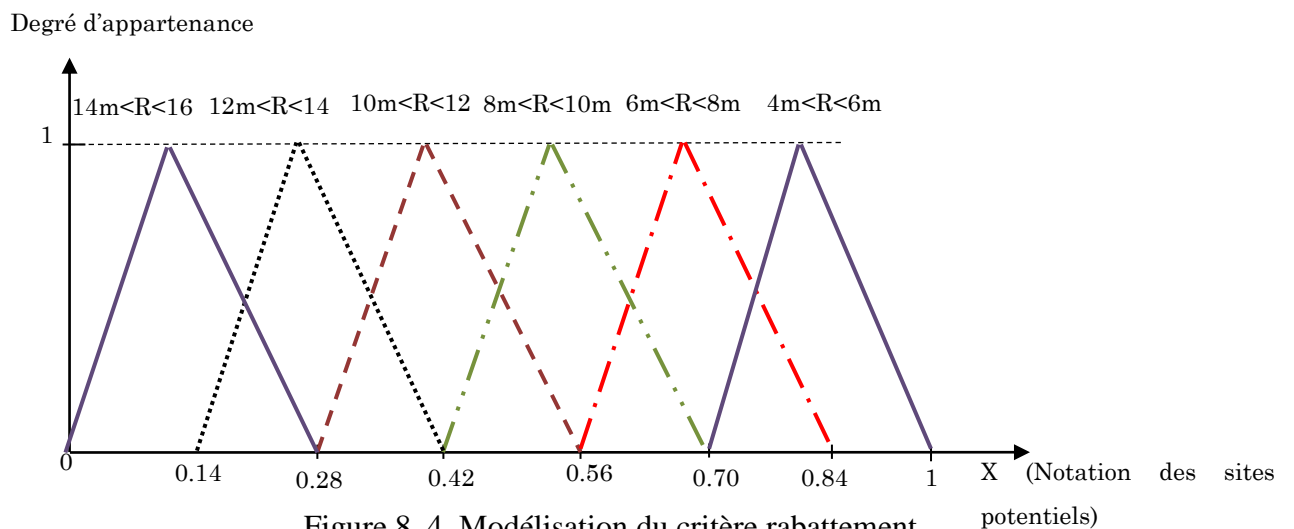


Figure 8. 4. Modélisation du critère rabatement

- La modélisation du critère débit est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "débit", comme indiqué dans la figure 8.5.

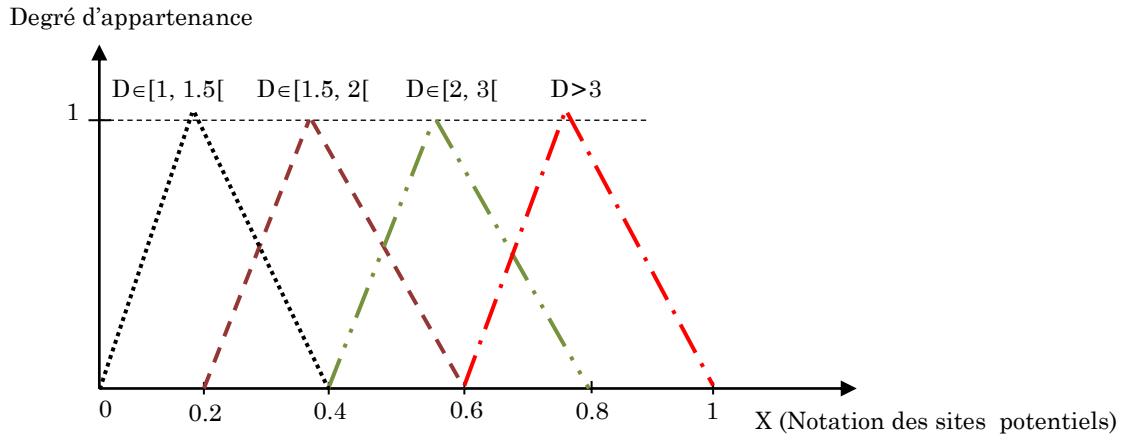


Figure 8. 5. Modélisation du critère Débit " D (l/s) "

- La modélisation du critère profondeur de l'aquifère est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "profondeur de l'aquifère", comme indiqué dans la figure 8.6.

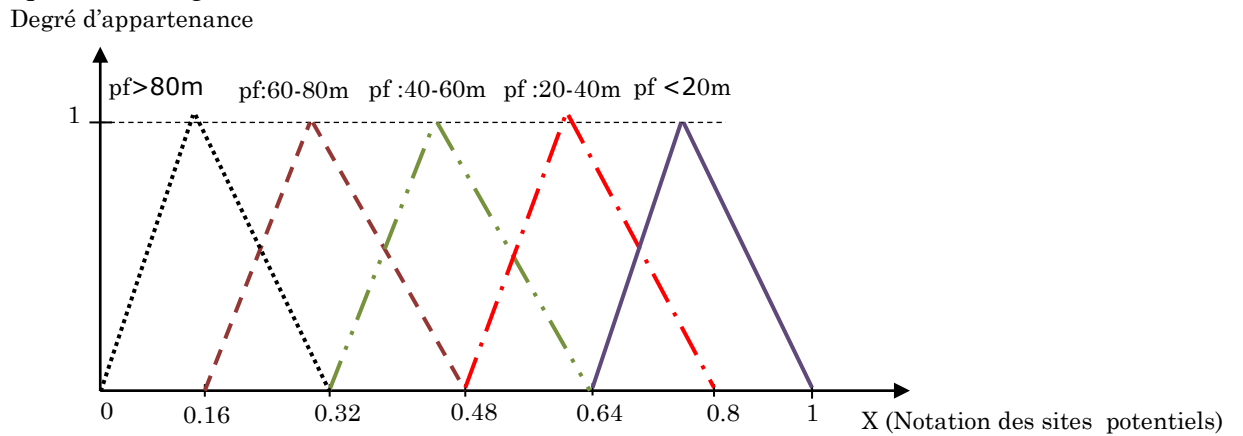


Figure 8. 6. Modélisation du critère profondeur de l'aquifère "pf (m)"

- La modélisation du critère recharge est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "recharge", comme indiqué dans la figure 8.7.

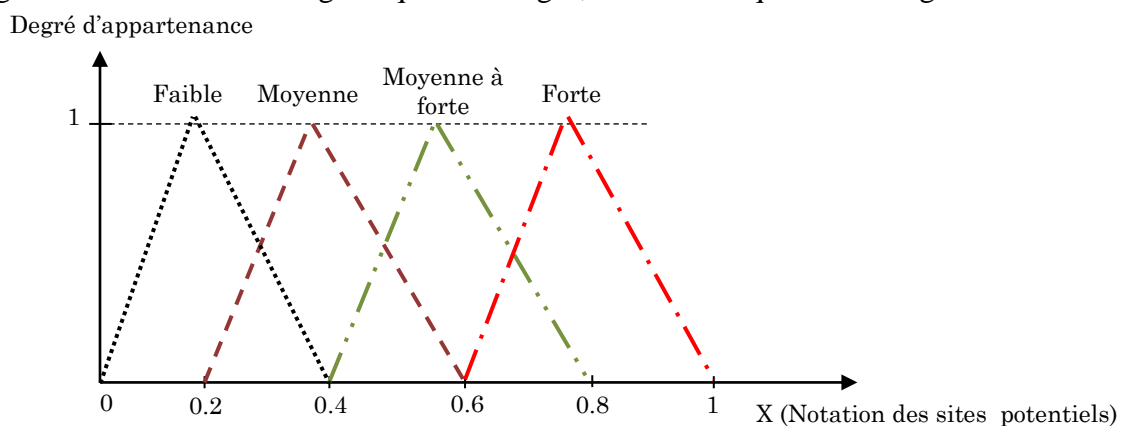


Figure 8. 7. Modélisation du critère recharge

- La modélisation du critère coefficient d'emménagement est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique "coefficient d'emménagement", comme indiqué dans la figure 8.8.

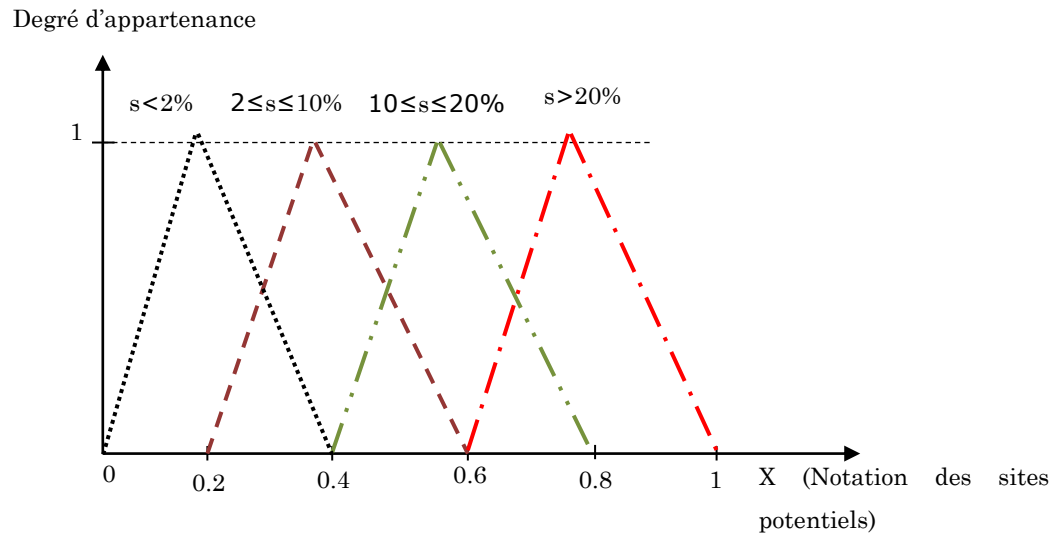


Figure 8. 8. Modélisation du critère coefficient d'emmagasinement "s"

- La modélisation du critère Transmissivité est exprimée sous forme de sous-ensembles flous triangulaires de la variable linguistique " Transmissivité", comme indiqué dans la figure 8.9.

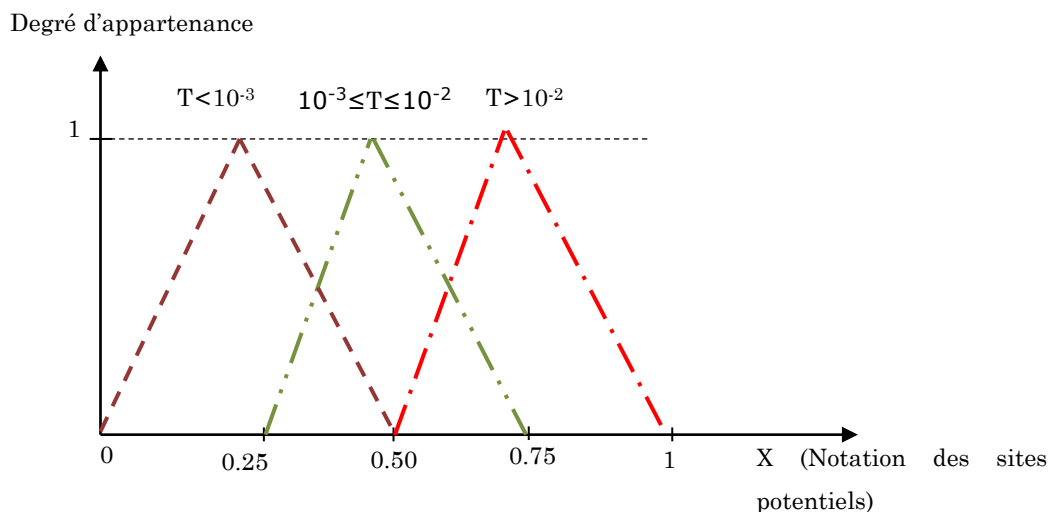


Figure 8. 9. Modélisation du critère Transmissivité " T (m²/s) "

- Un huitième critère est aussi pris en considération, dans cette étape de traitement, c'est celui de la qualité de l'eau souterraine. Vu l'importance de l'activité agricole sur le plateau de Mostaganem, c'est la qualité de l'eau pour l'irrigation qui va être prise en compte dans la notation des sites potentiels selon la figure 8.10.

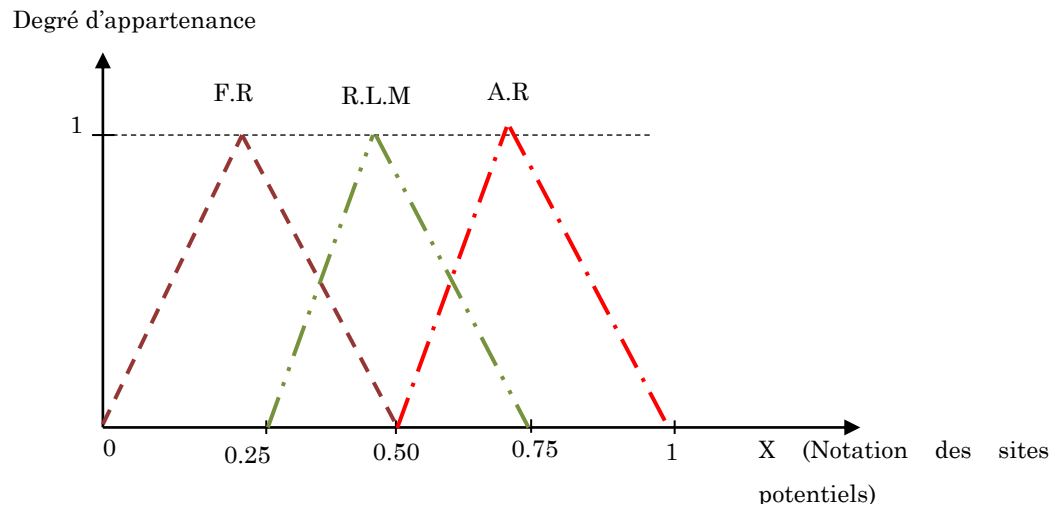


Figure 8. 10. Modélisation du critère qualité de l'eau

Avec : A.R. : Aucune Restriction.
 R.L.M. : Restriction Légère à Modérée.
 F.R. : Forte Restriction.

Pour la notation des sites potentiels sur le critère qualité de l'eau, il a fallu interpoler les valeurs de toxicité au chlorure, au sodium et à la salinité selon les puits situés à proximité de chaque site potentiel.

8.2.2 Notation floue des sites potentiels

Dans cette étape, et sur la base de concertation faite avec les experts du domaine, deux (02) évaluations ont pu être dégagées (tableau 8.1). Les notations des sites potentiels sont faites en prenant en compte les fonctions d'appartenance propre à chaque critère.

La pondération des critères a également été effectuée sous la forme de nombres flous triangulaires, en fonction de leur importance relative et de l'intervention de chaque critère dans le processus de décision. Le résultat de cette notation est présenté au tableau 8.2.

Selon le tableau 8.1, la notation floue des 'm' alternatives ($m = 10$) {Site1, Site2, ... Site10} par rapport à chacun des 'k' critères ($k = 8$) (Rabatement, vulnérabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, recharge, débit, qualité de l'eau, profondeur de l'aquifère) est donnée sous la forme de nombres flous triangulaires. Les résultats sont présentés dans les tableaux 8.3 et 8.4.

Critères	Classification SIG	Notation selon l'expert 1	Notation selon l'expert 2
Rabatement	4m - 6m	(0.70, 0.84, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)
	6m - 8m	(0.56, 0.70, 0.84)	(0.6, 0.75, 0.90)
	8m - 10m	(0.42, 0.56, 0.70)	(0.50, 0.60, 0.75)
	10m - 12m	(0.28, 0.42, 0.56)	(0.35, 0.45, 0.60)
	12m - 14m	(0.14, 0.28, 0.42)	(0.15, 0.30, 0.45)
	14m - 16m	(0.00, 0.14, 0.28)	(0.00, 0.15, 0.30)
Transmissivité	Bonne	(0.50, 0.75, 1.00)	(0.60, 0.80, 1.00)
	Moyenne	(0.25, 0.50, 0.75)	(0.35, 0.60, 0.80)
Coefficient d'emmagasinement	$S > 0.2$	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.65, 0.85, 1.00)
	$0.1 \leq S \leq 0.2$	(0.40, 0.60, 0.80)	(0.45, 0.65, 0.75)
Vulnérabilité	Faible	(0.40, 0.60, 0.80)	(0.45, 0.65, 0.75)
	Moyenne	(0.20, 0.40, 0.60)	(0.25, 0.45, 0.55)
Débit	1 l/s - 1.5 l/s	(0.00, 0.20, 0.40)	(0.00, 0.25, 0.35)
	1.5 l/s - 2 l/s	(0.20, 0.40, 0.60)	(0.25, 0.45, 0.55)
	2 l/s - 3 l/s	(0.40, 0.60, 0.80)	(0.45, 0.65, 0.75)
	> 3 l/s	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.65, 0.85, 1.00)
Recharge	Moyenne	(0.20, 0.40, 0.60)	(0.25, 0.45, 0.55)
	Moyenne à forte	(0.40, 0.60, 0.80)	(0.45, 0.65, 0.75)
Profondeur	40m - 60m	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.35, 0.50, 0.60)
	20m - 40m	(0.48, 0.64, 0.80)	(0.50, 0.60, 0.75)
Qualité d'eau	A.R.	(0.50, 0.75, 1.00)	(0.60, 0.80, 1.00)
	R.L.M	(0.25, 0.50, 0.75)	(0.35, 0.60, 0.80)
	F.R	(0.00, 0.25, 0.50)	(0.00, 0.35, 0.60)

Tableau 8. 1. Notations floues des critères selon deux experts.

Critères	Experts	
	Expert 1	Expert 2
Rabatement	(0.90, 0.95, 1.00)	(0.85, 0.90, 1.00)
Transmissivité	(0.60, 0.65, 0.70)	(0.65, 0.70, 0.75)
Coefficient d'emmagasinement	(0.60, 0.65, 0.70)	(0.65, 0.70, 0.75)
Recharge	(0.50, 0.55, 0.60)	(0.50, 0.55, 0.60)
Vulnérabilité	(0.50, 0.55, 0.60)	(0.50, 0.55, 0.60)
Débit	(0.35, 0.40, 0.45)	(0.35, 0.35, 0.40)
Profondeur	(0.15, 0.25, 0.30)	(0.20, 0.25, 0.30)
Qualité de l'eau souterraine	(0.15, 0.20, 0.25)	(0.15, 0.20, 0.25)

Tableau 8. 2. Notations floues des poids des différents critères selon deux experts

Alternatives	Critères							
	Transmissivité	Coefficient "s"	Recharge	Vulnérabilité	Débit	Profondeur	Qualité eau	Rabatement
Site1	(0.5, 0.75, 1.00)	(0.6, 0.8, 1.00)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.14, 0.28, 0.42)
Site2	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0, 0.25, 0.5)	(0.28, 0.42, 0.56)
Site3	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.48, 0.64, 0.8)	(0.5, 0.75, 1)	(0.56, 0.70, 0.84)
Site4	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	0.2, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.28, 0.42, 0.56)
Site5	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.5, 0.75, 1)	(0.70, 0.84, 1.00)
Site6	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.6, 0.8, 1)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.5, 0.75, 1)	(0.42, 0.56, 0.70)
Site7	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	0.2, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.48, 0.64, 0.8)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.14, 0.28, 0.42)
Site8	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.48, 0.64, 0.8)	(0.5, 0.75, 1)	(0.42, 0.56, 0.70)
Site9	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.6, 0.8, 1)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.5, 0.75, 1)	(0, 0.14, 0.28)
Site10	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.2, 0.4, 0.6)	(0.32, 0.48, 0.64)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.14, 0.28, 0.42)

Tableau 8. 3. Notations floues des sites potentiels selon le premier expert.

Alternatives	Critères							
	Transmissivité	Coefficient "s"	Recharge	Vulnérabilité	Débit	Profondeur	Qualité eau	Rabatement
Site1	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.65, 0.85, 1)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.35, 0.6, 0.80)	(0.15, 0.30, 0.45)
Site2	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.00, 0.35, 0.60)	(0.35, 0.45, 0.5)
Site3	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.5, 0.6, 0.75)	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.6, 0.75, 0.90)
Site4	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.35, 0.45, 0.5)
Site5	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.75, 0.90, 1)
Site6	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.65, 0.85, 1)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.65, 0.85, 1)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.60, 0.80, 1.00)	(0, 0.15, 0.30)
Site7	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.5, 0.6, 0.75)	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.15, 0.30, 0.45)
Site8	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.5, 0.6, 0.75)	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.5, 0.6, 0.75)
Site9	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.65, 0.85, 1)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.65, 0.85, 1.0)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.60, 0.80, 1.00)	(0, 0.15, 0.30)
Site10	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.45, 0.65, 0.75)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.25, 0.45, 0.55)	(0.35, 0.50, 0.60)	(0.35, 0.6, 0.8)	(0.15, 0.30, 0.45)

Tableau 8. 4. Notations floues des sites potentiels selon le deuxième expert.

8.2.3 Agrégation des notations floues des experts et calcul de l'indice flou "F_i"

Sur la base des équations d'agrégation 4.19, 4.20, 4.21 et 4.22, présentées dans la section 4.3.3 du chapitre 4, le programme de la méthode MCFAD que nous avons élaboré sous MATLAB, calcul l'indice de pertinence flou (F_i) de chaque site potentiel. Les indices F_i obtenus sont des nombres flous triangulaires (voir tableau 8.5).

Alternatives	Indice de pertinence flou (F_i)		
Site1	0.1848	0.3084	0.4381
Site2	0.1538	0.2737	0.3915
Site3	0.1965	0.3231	0.4539
Site4	0.1682	0.2893	0.4092
Site5	0.2221	0.3496	0.4793
Site6	0.1770	0.3025	0.4342
Site7	0.1530	0.2766	0.4031
Site8	0.1796	0.3020	0.4314
Site9	0.1540	0.2783	0.4079
Site10	0.1408	0.2631	0.3867

Tableau 8. 5. Indices de pertinence flous des sites potentiels.

8.2.4 Classement des sites potentiels selon leur indice F_i

Une fois les valeurs des indices de pertinence flous (F_i) calculés, un classement de ces indices est agrégé selon la méthode MCFAD (Chang et Chen, 1994), en utilisant le concept de Maximisation et Minimisation des ensembles avec des poids flous (Chapitre 4, section 4.3.2). Les résultats de cette étape sont présentés dans le tableau 8.6. Les valeurs $U(F_i)$ donnent le classement de tous les sites potentiels de forage.

Sites potentiels classés selon la valeur de " $U(F_i)$ "	Valeurs " $U(F_i)$ " de classement
Site5	0.6106
Site3	0.5566
Site1	0.5268
Site6	0.5148
Site8	0.5139
Site4	0.4836
Site9	0.4641
Site7	0.4593
Site2	0.4502
Site10	0.4302

Tableau 8. 6. Classement des sites potentiels.

8.2.5 Carte de décision finale et interprétation

La carte de décision finale est obtenue en intégrant le classement des sites potentiels dans la table attributaire SIG, figure 8.11.

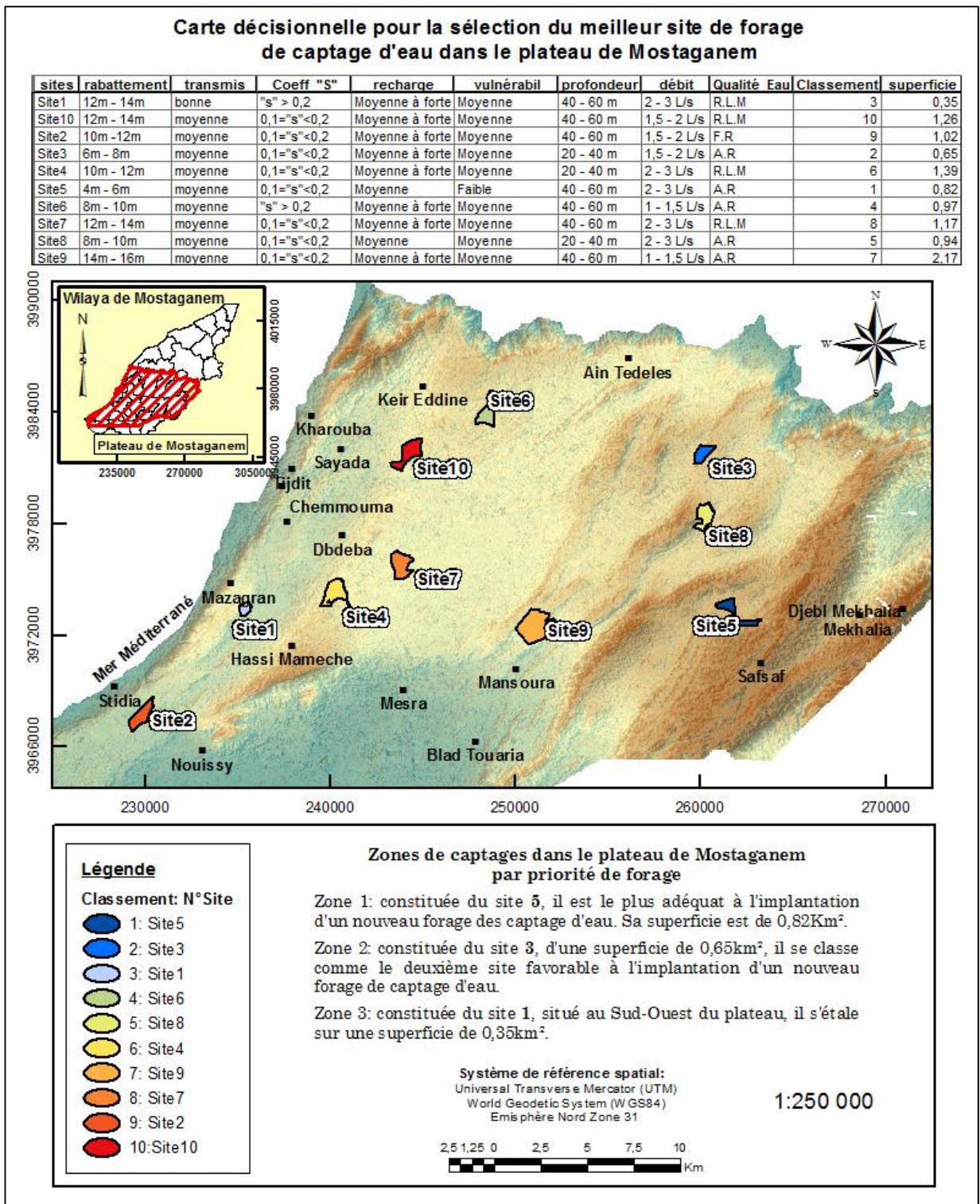


Figure 8. 11. Carte de décision finale et classement de sites potentiels de forage d'eau
 Les résultats obtenus montrent que le site 5, situé à l'Est du plateau se classe en première position dans le classement final. Avec une valeur de $U(F_5) = 0.6106$. Ce site se distingue des autres sites potentiels, comme étant le site potentiel le plus adéquat à l'implantation d'un nouveau forage de captage d'eau.

Suivi des sites potentiels 3 et 1 avec des valeurs de classement de $U(F_3) = 0.5566$ et $U(F_1) = 0.5268$, respectivement. Ces sites se situent respectivement à l'Est et au Sud-ouest du plateau.

Les trois premiers sites dans le classement des sites potentiels ont les caractéristiques suivantes:

- Le site 5 se caractérise par:
 - une transmissivité moyenne;
 - un coefficient "s" compris entre 0,1 et 0,2;
 - une recharge moyenne,
 - une faible vulnérabilité,
 - un débit compris entre 2 à 3 l/s;
 - une profondeur comprise entre 40 à 60m;
 - et il se trouve dans une zone de rabattement de 4 à 6m.
- Le site 3 se caractérise par:
 - une transmissivité moyenne;
 - un coefficient "s" compris entre 0,1 et 0,2;
 - une recharge moyenne à forte,
 - une vulnérabilité moyenne,
 - un débit compris entre 1,2 à 2 l/s;
 - une profondeur comprise entre 20 à 40m;
 - et il se trouve dans une zone de rabattement de 6 à 8m.
- Le site 1 se caractérise par:
 - une bonne transmissivité;
 - un coefficient "s" compris $>0,2$;
 - une recharge moyenne à forte,
 - une vulnérabilité moyenne,
 - un débit compris entre 2 à 3 l/s;
 - une profondeur comprise entre 40 à 60m;
 - et il se trouve dans une zone de rabattement de 12 à 14m.

On remarque aisément que, ces trois sites ont de bonnes performances par rapport aux différents critères. Le site 5 est nettement différent des autres sites par le fait qu'il se trouve dans une zone à piézométrie relativement stable.

8.3 Validation des résultats

8.3.1 Analyse de robustesse

Dans un processus de prise de décision qui vise à choisir le meilleur site potentiel pour le forage de captage d'eau, il est nécessaire d'évaluer la robustesse de la méthode utilisée. Un léger changement dans la valeur attribuée aux poids des critères change-t-il le classement des sites potentiels? Pour répondre à cette question, l'analyse de sensibilité utilisant la simulation de Monte Carlo a été réalisée pour déterminer la probabilité de changement dans l'ordre de classement des sites potentiels. Par conséquent, les poids des huit critères, fournis par les experts sous la forme d'un ensemble flou triangulaire, ont subi une variation aléatoire de Monte Carlo dans une plage de 15%. Les résultats de 100 simulations sont présentés à la figure 8.12.

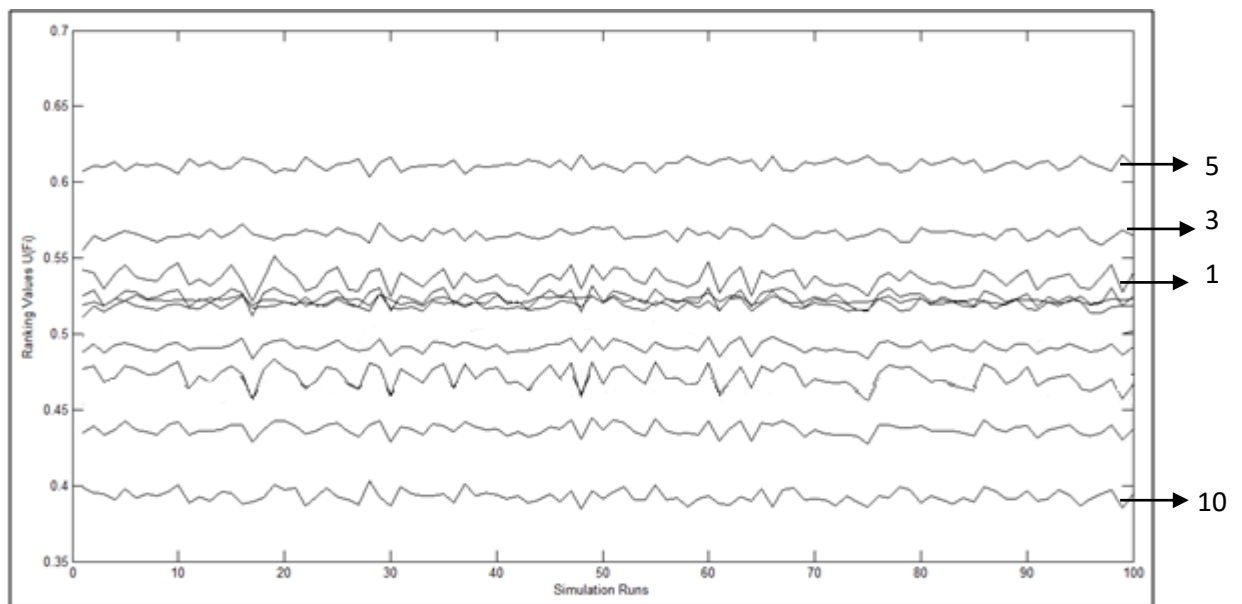


Figure 8. 12. Simulation de Monte Carlo (Analyse de robustesse).

On peut observer que le site 5 domine complètement le classement de tous les autres sites (avec une fiabilité de 100%) malgré un certain degré de variation des poids de décision. Le site 3 reste deuxième avec 100%, suivi par le site 1 qui reste au troisième rang à 100% également. Les 100 simulations indiquent que le classement des 10 sites potentiels reste le même que celui indiqué dans le tableau 8.6 à l'exception des sites 4, 6 et 8 dont les positions dans le classement se chevauchent de temps à autre, restant au milieu du classement général. Ce chevauchement des résultats est principalement attribuable à la proximité des évaluations de ces sites. Par conséquent, on peut dire que ces sites sont équivalents. Les sites 9, 7, 2 et 10 prennent respectivement les dernières positions dans le classement. Le site 10 reste le moins bon du classement avec une fiabilité de 100%.

Puisque la perturbation dans les poids des critères n'a pas perturbé grandement l'ordre des sites potentiels, avec des sites encore dominants et des sites restant à la dernière position, on peut dire que la méthode floue utilisée dans cette étude est robuste.

8.3.2 Comparaison avec les résultats du modèle mathématique de l'ANRH

SOGREAH (Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques) a été mandaté par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) afin de réaliser un programme d'étude et faire la modélisation mathématique de quatre systèmes aquifères, notamment le système aquifère du plateau de Mostaganem (ANRH, 2009). L'objectif de ce projet était la réalisation d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau de cet aquifère.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre recherche sont confrontés à ceux publiés dans le rapport de l'ANRH (2009) dans un but de validation.

Dans la suite de ce document, nous présentons quelques détails utiles récapitulant le rapport final de l'étude de SOGREAH, qui présente les principaux résultats de la modélisation mathématique, ainsi que les recommandations pour une gestion rationnelle de l'eau pour le plateau de Mostaganem.

8.3.2.1 Données collectées pour le modèle conceptuel

La recherche de données a été menée de manière à rassembler les différents éléments nécessaires à la définition d'un modèle conceptuel, représentant fidèlement le fonctionnement du système aquifère.

Un modèle conceptuel est défini par les composants suivants:

- le domaine modélisé et les écoulements pris en compte,
- les caractéristiques vis-à-vis des écoulements, des terrains du domaine modélisé,
- les conditions hydrauliques prévalant aux limites de la zone modélisée.

Dans l'optique de l'élaboration du modèle conceptuel par SOGREAH, les travaux relatifs à la phase d'acquisition des données ont porté principalement sur :

- La géologie du réservoir : la géométrie du système aquifère et les caractéristiques hydrodynamiques des terrains considérés;
- Les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir : la recharge, les prélèvements, les interactions nappe-oued et la piézométrie.

L'aquifère le plus perméable du plateau de Mostaganem est constitué par des grès à ciment calcaire de couleur jaune atténué, à éléments grossiers, coquilles, lumachelle au niveau du Calabrien (Quaternaire). Son épaisseur varie entre 40 et 100 m.

Les terrains peu perméables situés au-dessus ou en-dessous de la formation aquifère ont une épaisseur variable. Ainsi, il existe des phénomènes de drainance et de communication localisés au niveau des grès du Calabrien.

La nappe du plateau de Mostaganem est une nappe libre. L'alimentation de la nappe libre se fait donc :

- Par infiltration directe au niveau des zones d'affleurement;
- Par percolation aux travers des terrains sus-jacents;

8.3.2.2 Démarche adoptée par SOGREAH

Les scénarios issus du modèle mathématique sont simulés sur une période allant jusqu'à 2020. Cette période est estimée suffisamment longue pour tester la réactivité du système aquifère lorsqu'il est soumis à des modifications de ses conditions aux limites (recharge et prélèvement d'eau). De plus, faire des hypothèses sur les recharges et/ou les prélèvements pour une longue période serait plus délicat et difficile à argumenter.

Les scénarios proposés dans les rapports de SOGREAH (ANRH, 2009), sont des scénarios qui ont pour vocation de servir d'appui à la gestion de la ressource en eau.

Un premier scénario à simuler est le scénario de référence qui correspond globalement à un statu quo (à l'exception d'une évolution 'normale' de la population et donc des prélèvements AEP associés) par rapport aux conditions actuelles. Ce scénario dit 'de référence' permet ensuite la comparaison relative de l'impact sur la nappe des autres scénarios.

Pour la validation des résultats de notre étude nous nous contentons de présenter le scénario de référence fourni par l'ANRH (2009).

8.3.2.3 Hypothèses du scénario de référence

Pour ce scénario de référence, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- Une recharge pluviométrique moyenne définie à partir des données mensuelles observées en 2001 ;
- L'ensemble des prélèvements ont été considérés comme constants jusqu'en 2020.

8.3.2.4 Résultats du scénario de référence

Les résultats du scénarios de référence sont présentés sous forme de cartes piézométriques en 2020 et des chroniques d'évolution de la piézométrie pour les piézomètres considérés comme représentatifs de l'évolution de la nappe lors de la phase de calage du modèle (voir figure 8.13, et figure 8.14).

Le maintien des conditions actuelles de prélèvements dans la nappe jusqu'à 2020 provoque une baisse continue du niveau piézométrique. De 2005 à 2020, la nappe se rabat d'environ 15 m au centre du plateau, où l'exploitation de la ressource est la plus importante. Les chroniques

piézométriques montrent que la réaction de la nappe n'est pas identique sur l'ensemble de la zone d'étude. Sur le piézomètre d'Aïn Soltane, situé à l'est du plateau de Mostaganem, une baisse du niveau de la nappe de l'ordre de 2 m est observée. Dès que l'on s'éloigne des zones de fort pompage, la baisse piézométrique est beaucoup plus faible.

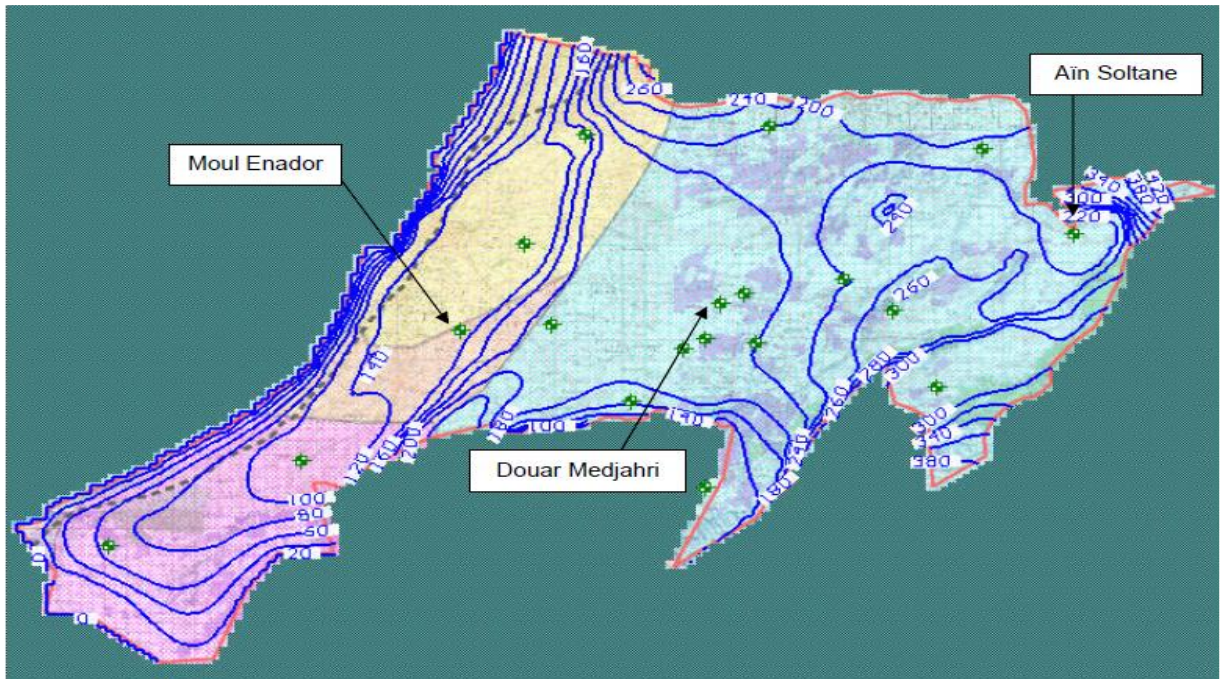


Figure 8. 13. Scénario 1 (référence) : Piézométrie simulée en 2020 (ANRH, 2009)

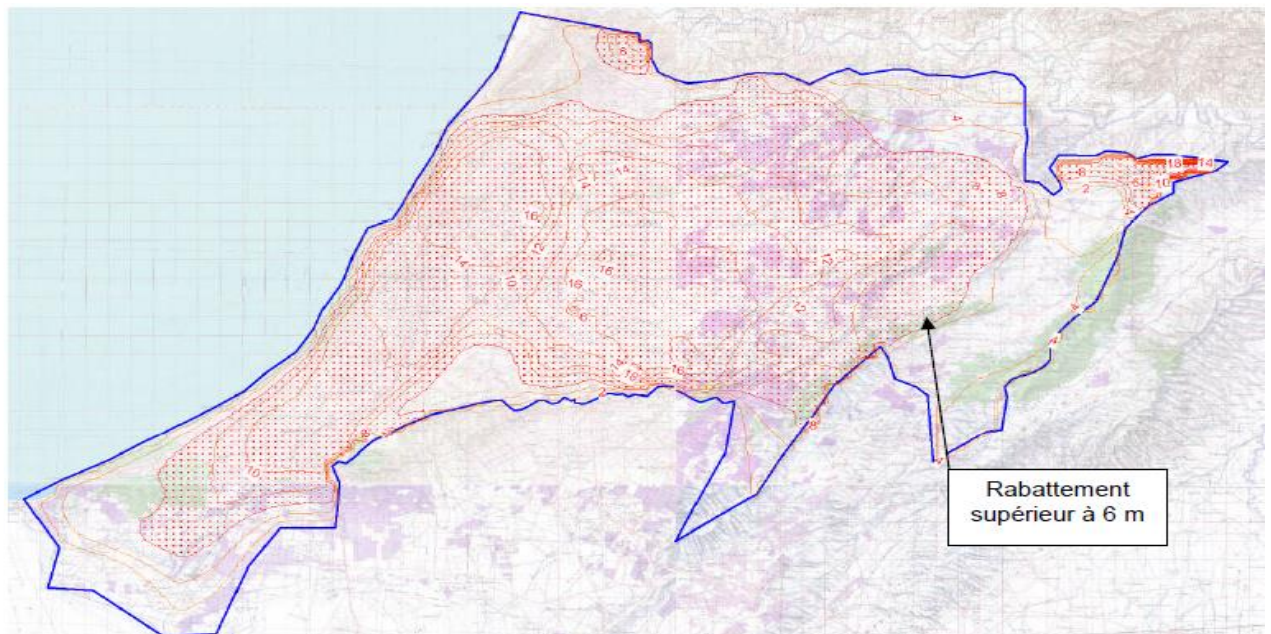


Figure 8. 14. Scénario 1 (référence) : Rabattement de la nappe entre les piézométries simulées en septembre 2004 et septembre 2020. (ANRH, 2009)

8.3.2.5 Comparaison des résultats avec le rabattement du scénario de référence

En comparant la carte de classement des sites potentiels avec celle de rabattement de la nappe du plateau de Mostaganem, issue de la simulation par modèle numérique (figure 8.14), les constatations suivantes ont été faites sur la figure 8.15:

1. Les sites les plus favorables à l'implantation de nouveaux forages, notamment les sites 5, 3 et 1, coïncident avec les zones de rabattement les plus faibles rencontrées dans la zone d'étude.
2. Le site potentiel 10 classé en dernière position du classement, se trouve également dans les zones de rabattement le plus fort de la nappe du plateau, à savoir des rabattements de 14m et plus.

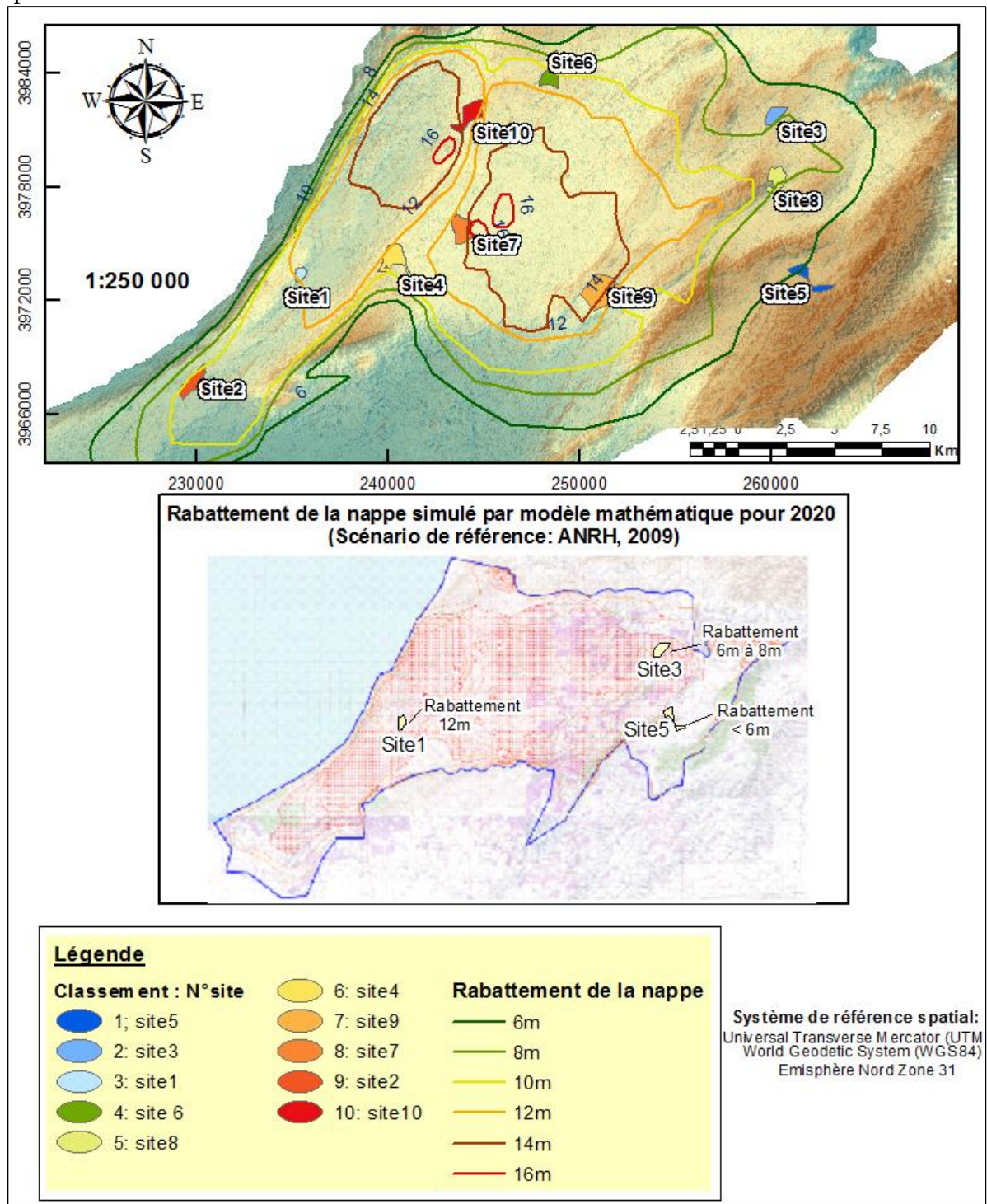


Figure 8. 15. Comparaison des résultats avec le rabattement du scénario de référence

8.4 Conclusion

La méthode MCFAD a permis de mettre en évidence un rangement des sites potentiels du meilleur au moins bon.

Le site 5 apparaît comme le site le plus favorable dans ce processus de sélection avec une faible vulnérabilité, une transmissivité et une recharge moyenne, un coefficient d'emménagement compris entre 0.1 et 0.2, un débit compris entre 2 à 3 l/s et une profondeur comprise entre 40 et 60m. Ce qui justifie la valeur la plus élevée de l'indice de classement. Les sites 3 et 1 se présentent, respectivement, dans la deuxième et la troisième position du classement, ce qui nous amène à dire qu'après le site 5, le décideur a aussi le choix entre ces deux sites.

Le site 10 est classé en dernière position. Ce classement est justifié par les évaluations des critères qui sont faibles relativement aux autres sites.

Une analyse de robustesse a été réalisée pour estimer la cohérence du classement des sites potentiels à l'aide d'une simulation de Monte Carlo, en modifiant les pondérations liées aux critères sélectionnés. Les résultats indiquent que le site potentiel 5 domine complètement les autres sites malgré des variations des poids des critères dans une plage de 15%.

La détermination des poids des critères reste la tâche la plus difficile dans la méthode MCFAD utilisée dans cette étude. L'introduction de la connaissance des experts du domaine donne un aspect très avantageux à la méthode MCFAD utilisée. Cependant, le désavantage de cette méthode réside dans la notation des sites potentiels par rapport aux critères et l'évaluation de leurs poids, qui peuvent plus ou moins différer selon les experts. Dans certains cas, la concertation avec les experts peut converger vers des évaluations très différentes, voir même, contradictoires.

Dans le cas de cette étude, il existe une grande similitude entre les appréciations des experts, ce qui n'affecte pas le processus de décision. Mais le fait d'avoir un écart important dans les jugements des experts peut avoir un impact significatif sur le processus de prise de décision. L'augmentation du nombre d'experts rend le processus décisionnel plus précis et plus crédible.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'aspect stratégique et vital de l'eau, caractérisé par la rareté et la pénurie, impose une politique de mobilisation maximale et d'exploitation rationnelle de cette ressource naturelle. Cette étude a été motivée par le besoin d'une gestion rationnelle des eaux souterraines à travers le choix approprié de sites de forage de captage d'eau.

Les résultats de cette recherche montrent que le Système d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) améliore le potentiel d'applications liées à la gestion des eaux souterraines et apporte un soutien essentiel aux décideurs dans le choix des sites d'implantation de forages de captage d'eau.

Le SADS, établi dans cette étude, est appliqué à la zone du plateau de Mostaganem; il est composé de deux phases:

La première phase utilise une approche SIG pour sélectionner les sites potentiels de forage de captage d'eau. Cette sélection est basée sur divers critères géologiques et hydrologiques de la zone d'étude. Les travaux relatifs à la collecte et la détermination de ces critères ont porté principalement sur:

1. Une étude bibliographique approfondie qui vise à déterminer les différents critères et paramètres permettant de choisir les sites potentiels de forage de captage d'eau. Cette étude a permis d'aboutir aux critères suivants: le rabattement de la nappe, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement, le débit, la profondeur totale de l'aquifère, la recharge potentielle, les zones les plus vulnérable à la pollution et la qualité des eaux de la nappe.
2. La collecte des données géologiques, climatologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude qui a révélé que l'aquifère du plateau de Mostaganem est celui du Calabrien. Il s'agit de grès sableux et de calcaires ayant pour substratum les marnes du Mio-Pliocène. Le plateau de Mostaganem, se caractérise par un climat semi-aride, une pluviométrie moyenne de 300mm/an et un réseau hydrographique modeste.
3. La collecte, la numérisation et la spatialisation des paramètres hydrodynamiques de la nappe du plateau de Mostaganem, notamment, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de la nappe.
4. L'étude de la piézométrie de la nappe de Mostaganem par krigeage flou. En effet, afin d'éviter l'implantation de points de captage d'eau dans des sites à grand risque de rabattement, et d'en produire des forages échoués, le critère rabattement déduit de l'étude de la piézométrie de la zone d'étude, est un critère prépondérant qui est pris en considération dans cette étude. L'utilisation du krigeage flou pour tenir compte de l'incertitude qui entache les paramètres du variogramme théorique rend la procédure de krigeage plus pertinente et permet d'avoir une

meilleure modélisation du critère rabattement. L'environnement de programmation R a été utilisé pour l'application du krigeage flou.

5. L'établissement des cartes débit et profondeur totale de l'aquifère par Krigeage flou sous R. Le débit moyen des puits et forages existants sur le plateau de Mostaganem, varie entre 0,36 l/s et 8 l/s. La profondeur totale de l'aquifère varie entre 6 à 150 m sur la totalité du plateau.
6. L'étude de la vulnérabilité de la nappe du plateau de Mostaganem à la pollution et sa validation : cette étude a révélé l'existence de deux classes, faible et moyenne.
7. L'étude de la recharge potentielle de la nappe du plateau de Mostaganem et sa validation : Les résultats de cette étude montrent que le taux d'infiltration des eaux de précipitation vers la nappe est modéré, il est de l'ordre de 16%, avec un potentiel de recharge équivalent à 46 millions de mètres cubes par an. Ce résultat est parfaitement logique par rapport aux propriétés hydrogéologiques et climatiques de la région.
8. L'étude de la qualité des eaux de la nappe du plateau de Mostaganem et sa validation : cette étude a montré la dominance du faciès chloruré sodique.

Le logiciel ArcGis a été principalement utilisé dans cette phase. Les outils de reclassification et de superposition offerts par ce logiciel nous ont permis de créer des cartes thématiques raster, de généraliser l'information sur l'ensemble du plateau de Mostaganem, de superposer, additionner et soustraire des couches thématiques différentes. Cette phase est concrétisée par l'obtention d'une carte de sélection de 10 sites potentiels de forage de captage d'eau. Ainsi, les SIG, par leur capacité de stockage, de gestion, d'analyse, de modélisation et d'affichage de données se présentent comme l'outil le plus adéquat pour appréhender les problèmes multicritères à référence spatiale.

A ce stade du processus de prise de décision, il est difficile de choisir le meilleur site pour un forage de captage d'eau. La méthode Multi-Critère Floue d'Aide à la Décision (MCFAD) est utilisée dans une deuxième phase, pour le classement des sites potentiels.

Les évaluations floues des 10 sites potentiels par rapport aux critères sont dérivées de la première phase. Elles sont décrites par des variables linguistiques qui sont par la suite modélisées en nombres flous triangulaires. Cette modélisation est faite après concertation avec des experts du domaine. Des indices de pertinence flous sont calculés par la méthode MCFAD pour l'ensemble des sites potentiels. Ces indices permettent le classement des sites potentiels du meilleur au moins bon.

Les sites 5, 3 et 1 sont classés en première position. Le site 10 est classé en dernière position. Une simulation de Monte Carlo a été réalisée pour apprécier la cohérence du classement des sites

potentiels. Les résultats de cette simulation, montrent que le classement reste stable et le site 5 est toujours classé en premier.

La combinaison des SIG et de la méthode multicritère floue a permis la réalisation d'une carte décisionnelle permettant le choix de sites d'implantation de forage de captage d'eau stratégique qui assure une eau de bonne qualité et des forges rentables et durables.

L'utilisation d'outils d'aide à la décision tels que les SIG, qui combinent la cartographie et la gestion de bases de données spatiales, offre des opportunités d'analyse spatiale, de gestion et de représentation optimisée des eaux souterraines. La méthode MCFAD permet l'agrégation de critères flous et de données hétérogènes.

Une carte de décision finale est établie à la fin de cette recherche, en intégrant les valeurs de classement des sites potentiels dans la table attributaire SIG, elle facilite ainsi la prise de décision grâce à une cartographie claire et représentative. Par conséquent, combiner un SIG et une méthode MCFAD, qui offre la capacité d'introduire les opinions des experts du domaine, a finalement été utile pour établir un système d'aide à la décision spatiale (SADS) qui contribue à la gestion, l'exploitation et l'extraction des eaux souterraines par forage, en présence d'informations imparfaites et des données imprécises.

Néanmoins, le plus grand souci rencontré lors de cette recherche est celui de la collecte de données nécessaires à l'établissement d'un SADS fiable. Puisque, la robustesse d'un SADS dépend directement de l'exhaustivité et de la précision des données récoltées. En outre, bien que l'approche SIG offre des possibilités d'analyse spatiale, de gestion et de représentation optimisée des eaux souterraines, l'inconvénient de cette approche réside dans sa sensibilité à l'exactitude des données hydrogéologiques disponibles. L'ajout d'autres critères dans le processus d'analyse SIG peut réduire le nombre de sites potentiels et donner plus de finesse et de précision au résultat.

Ainsi, vu les avantages multiples qu'offre le SADS développé dans cette étude, son utilisation par l'ANRH ou les services hydrauliques concernés en Algérie est souhaitable, voire nécessaire.

Pour les travaux futurs, il est souhaitable de :

- Etudier la corrélation entre les critères, afin de réduire le nombre de critères intervenant dans le processus de prise de décision et améliorer les résultats obtenus.
- Prendre en compte l'incertitude dans les données. Cela peut rendre la procédure du krigeage flou plus complexe, mais plus pertinente.

Références bibliographiques

- Abdalla F. 2012.** *Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: a case study from the Central Eastern Desert, Egypt.* J Afr Earth Sci 70:8–17. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.05.003>.
- Aboufirassi, M., Marino MA. (1983).** *Kriging of Water Levels in the Souss Aquifer.* Morocco. *Mathematical Geology.* Vol. 15, No. 4. p 537-551.
- Al-abadi AM, Shahid S, Ghalib HB, Handhal AM. 2017.** *A GIS-based integrated fuzzy logic and analytic hierarchy process model for assessing water-harvesting zones in Northeastern Maysan governorate, Iraq.* Arab J Sci Eng. 42(6):2487–2499.
- Allahyiranloo T, Abbasbandy S, Saneifard R. 2011.** *A method for ranking of fuzzy numbers using new weighted distance.* Math Comput Appl 16(2):359–369. <https://doi.org/10.3390/mca16020359>.
- Aller Linda., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J., Hacket G. 1987.** *DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.* (EPA 600/2-87). Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, États-Unis, 455 p.
- Allier D., Vittecoq B., Mardhel V. 2008.** *Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique.* Rapport final. BRGM/RP-56283-FR. Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2006 EAU D20.
- Altrock CV, Krause B. 1994.** *Multi-criteria decision-making in German automotive industry using fuzzy logic.* Fuzzy Sets Syst 63(3):375–380. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)90223-2](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)90223-2).
- ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). 2009.** Modélisation des grands aquifères. Etude de modelisation de 4 systemes d'aquiferes. Plateau de Mostaganem. Operation : ND5.312.6.261.375.02. Rapport de mission 4. N° 1 34 0167.
- ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). 2006.** Modélisation des grands aquifères. Etude de modelisation de 4 systemes d'aquiferes. Plateau de Mostaganem. Operation: ND5.312.6.261.375.02. Rapport de mission 1. N° 1 34 0167.
- An Ping, Moon Wax M., Rengz Andy. 1991.** *Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration.* Canadian journal of exploration géoophysics. Vol. 27, No.1, pp 1-11.
- Arnold, J. G.; Allen, P. M. 1999.** Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. Journal of the American Water Resources Association, v.35, p.411-424,.
- Assimakopoulos JH, Kalivas DP, Kollias VJ. 2003.** *A GIS-based fuzzy classification for mapping the agricultural soils for N-fertilizers use.* Sci Total Environ 309(1–3):19–33
- Ayers R.S. et al. (1985).** Water quality for agriculture. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Revision 1; <http://www.fao.org/docrep/003/T0234E/T0234E00.htm>).

- Baas SM, Kwakernaak H. 1997.** *Rating and ranking of multiple aspect alternative using fuzzy sets.* Automatica. Vol 13, pp 47–58.
- Baiche A. (1993) :** Hydrogéologie de la région de Mostaganem. Mem magister, Univ, Oran2 Ahmed Ben Ahmed.
- Bamba D.Ould Ahmed, Nouedou A.S., Djibo A., G., Ngangue T., & Diallo, S. 2005.** *Etat de l'art sur la conception et la mise en oeuvre d'un SIG*, Rapport du Centre de Ressources en TIC: Phase II de la Recherche Développement d'Interfaces Homme-Machine basées sur les technologies sans fil et les logiciels libres. Université Cheick Anta Diop de Dakar (Sénégal), p. 150.
- Bard Sylvain. 2004.** *Méthode d'évaluation de la qualité de données géographiques généralisées: Application aux données urbaines.* Paris : Thèse de doctorat de l'université de Paris 6.
- Bardossy, A., Bogardi, I., Kelly, W.E. (1990):** Kriging with imprecise (fuzzy) variograms. I: theory. Math. Geol. 22(1), 63–79
- Bardossy, A., Bogardi, I., Kelly, W.E. (1988):** Imprecise (fuzzy) information in geostatistics. Math. Geol. 20(4), 287–311
- Baroudi Z. 2010.** *Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Mostaganem.* Mémoire d'ingénieur d'Etat en hydrogéologie, Science de la terre. Univ. Oran.
- Basir zadeh H., Abbasi R. 2008.** *A new approach for ranking fuzzy numbers based on α -cuts.* J. Appl. Math. & Informatics. Vol. 26, No. 3 - 4, pp. 767 – 778.
- Belkhiri L, Mouni L, Boudoukha A. 2012.** *Geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: case of El Eulma aquifer, East Algeria.* J Afr Earth Sci 66–67:46–55. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.03.001>.
- B.N.E.D.E.R (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural). 2011.** *Carte d'occupation du sol de la wilaya de Mostaganem. Notice explicative.*
- Benzian Imane Fazilet. 2009.** *Etude par krigeage des donnees piezometriques de la nappe du plateau de mostaganem.* Mémoire de magister. Faculté des Sciens de la Terre et de l'Univ/ Oran2.
- Bhuiyan C., Ramesh P. Et Sing Flügel W.A. (2009) -** Modelling of ground water recharge-potential in the hard-rock Aravalli terrain, India: a GIS approach. *Environmental Earth Sciences*, vol. 59, p. 929-938.
- Bodelle J., Margat.J., 1980.** *L'eau souterraine en France.* Ed. Masson. 206 pages.
- Borsali Tewfik, 2008.** *Hydrogéologie de la région de Bel Hacel.* Mémoire de magister. Faculté des Sciens de la Terre et de l'Univ/ Oran2.
- Bouchon-Meunier Bernadette, 1995.** *La logique floue et ses applications.* Les éditions Addison-Wesley. France. ISBN : 2-87908-073-8.

- Bourgine B., Pédrón N. (2011)** Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Année 2. BRGM/RP-60153-FR, 85 p.
- Boussema, M.R. 1994.** *Base de données et cartographie numérique*. Thèse de Doctorat d'Etat es- Sciences Géologiques, Sujet complémentaire. Faculté des **Sciences** de Tunis, 64 p.
- Bosser Pierre., 2011.** Interpolation spatiale. Support de Cours. Ecole Nationale des Sciences Géographiques. France.
- Brodie, R. S. & Hostetler, S. (2005).** Examen des techniques d'analyse du flux de base à partir du flux Hydrogrammes. Proc. NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conf., Vol. 28.
- Caha J, Marek L, Dvorský J (2015):** Predicting PM10 Concentrations Using Fuzzy Kriging. Hybrid Artificial Intelligent Systems, pp. 371–381. Springer International Publishing Switzerland
- Cattle J.A., Mcbratney A.B., MINASNY B., (2002).** Kriging method for assessing the spatial distribution of urban soil lead contamination. *Journal of Environmental Quality*, 31, 1576-1588.
- Carden Giovanni, Malherbe Laure. (2003)** Evaluation des incertitudes associées aux méthodes géostatistiques. Rapport final (54p); Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. INERIS DRC-03-45599-2IEN-MECO-GCa-LMa – LCSQA-n°141_v1.
- Chakhar Salem. 2006.** *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine. 300 p
- Chan FTS, Chan MH, Tang NKH. 2000.** *Evaluation methodologies for technology selection.* *J Mater Process Technol* 107(1–3):330–337. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00679-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00679-8)
- Chang NB, Parvathinathan G, Breeden JB. 2008.** *Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region.* *J Environ Manag* 87(1):139–153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.011>
- Chang P, Chen Y. 1994.** *A fuzzy muticriteria decision making method for technology transfer strategy selection in biotechnology.* *Fuzzy Sets Syst* 63(2):131–139. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)90344-1](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)90344-1)
- Chen SM. 1996.** *Evaluating weapon systems using fuzzy arithmetic operations.* *Fuzzy Sets Syst* 77(3):265–276. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00096-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00096-8)
- Cheng CH. 1997.** *Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function.* *Eur J Oper Res* 96(2):343–350. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00026-4)
- Chesnaux, R. (2013).** Évaluation régionale de la recharge dans l'aquifère cristallin du rocher du Kenogami -Uplands, Canada. *Hydrol. Sci. J.* 58 (2), 421-436.
- Chilès, J.P. (1992).** The use of external-drift kriging for designing a piezometric observation network. In: Bárdossy, A., Editor, , 1992 *Geostatistical Methods: Recent Developments*

and Applications in Surface and Subsurface Hydrology Proceedings of an International Workshop at Karlsruhe, Germany, July 17–19, 1990, UNESCO, Paris, pp. 11–20 161 p.

- Chilès, J.P., Delfiner, P. (1999).** Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p
- Chu TC, Tsao CT. 2002.** *Ranking fuzzy numbers with an area between the centroid point and original point.* Comput Math Appl 43(1–2): 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00277-2](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00277-2)
- Croteau, A., Nastev, M. & Lefebvre, R. (2010)** Groundwater Recharge Assessment in the Chateauguay River Watershed. Can. Water Resour. J. Rev. Can. Ressour. Hydr. 35(4), 451–468.
- Dalloni M (1919) :** Le dome de Nouissy, les bains et la plaine d’effondrement de l’Habra (Algérie), C.R.Ada, Scie, Paris, (D), LCLXVIII.
- Danert K., Armstrong T., Adekile D., Duffau B., Ouedraogo I. & Kwei C., 2012.** *Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages.* Version française, Rural Water Supply Network, St Gallen, Suisse. <http://www.rural-water-supply.net>.
- Deep K, Kansal ML, Singh KP. 2007.** *Ranking of alternatives in fuzzy environment using integral value.* J Math Stat Allied Fields 1(2):13
- Deep Kusum, Kansal M., L., Singh K., P. 2007.** *Ranking of alternatives in fuzzy environment using integral value.* Journal of Mathematics, Statistics and Allied Fields. Vol. 1. Issue (2) P 13.
- Delteil J (1974) :** Tectonique de la chaîne alpine en Algérie, d’après l’étude du tell oriental (Monts de la Mina, Beni –Chougrane, Dahra), thèse doctorat.
- Demmak Abdelmadjid. 2012.** *La gouvernance des eaux souterraines, exemple de l’Algérie.* Regional consultation on the groundwater resources gouvernance in the Arab Sates. Amman. Jordan.
- DEMRRH 1978.** Notice Explicative: carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem au 1/100000. Direction des Etudes de Milieu et de la Recherche Hydraulique. Service hydrogéologie.
- Denis Antoine. 2016.** SIG - Initiation à ArcGIS. Manuel de travaux pratiques sur les Systèmes d’Information Géographique. Université de Liège (ULg). Arlon Campus Environnement. Département des Sciences et Gestion de l’environnement. Belgique.
- Desbarats A.J., C.E. Logan, M.J. Hinton, D.R. (2002).** On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. Journal of Hydrology, 255, (2002) p 25-38
- Diamond, P. (1989):** Fuzzy kriging. Fuzzy Sets Syst. 33(3), 315–332
- Di Martino F, Salvatore S, Vincenzo L. 2005.** *A fuzzy-based tool for modelization and analysis of the vulnerability of aquifers: a case study.* Int J Approx Reason 38(1):99–111

- Dixon B. 2005.** *Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool.* Appl Geogr 25(4):327–347. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.07.002>
- Duchaine, Doris. 1998.** *Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique).* Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de l'eau, 95 p.
- Dupuit, A. J. E. J. (1863).** *Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables: avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile.* Paris: Dunod. 304 pages.
- Einhorn H., Hogarth R. M. 1985.** Ambiguity and uncertainty in probabilistic inference. *Psychological Review.* Vol. 92, pp: 433-461.
- Fanti MP, Maione B, Naso D, Turchiano B. 1998.** Genetic multicriteria approach to flexible line scheduling. *Int J Approx Reason* 19(1–2):5–21. [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(98\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(98)00014-0)
- Farhadinia B. 2010.** *Ranking fuzzy numbers based on lexicographical ordering.* World Acad Sci Eng Technol Int J Math Comput Phys Elect Comput Eng 3(9)
- Faysse Nicolas, Hartani Tarik, Frija Aymen, Tazekrit Idir, Zairi Choukri. 2011.** *Usage agricole des eaux souterraines et initiatives de gestion au Maghreb : Défis et opportunités pour un usage durable des aquifères.* Note Economique de la BAD, pp.1-24. <hal-00728890>
- Flint, A. L., Flint, L. E., Kwicklis, E. M., Fabryka-Martin, J. T. & Bodvarsson, G. S. (2002).** Estimation de la recharge chez Yucca Mountain, Nevada, États-Unis: comparaison des méthodes. *Hydrogeol. J.* 10(1), 180–204.
- Floch jean-michel., 2018.** Manuel d'analyse spatiale, " Théorie et mise en œuvre pratique avec R" *Insee Méthodes* n° 131 - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/3635442/imet131-i-chapitre-5.pdf>
- Pardo-Igúzquiza E., (1998).** Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology*, 18, 1031-1047.
- Pomerol, J.-C. (1992).** *Aide à la decision et IA. L'intelligence Artificielle: une discipline et un carrefour inter-disciplinaire.*
- Gang L, Baniyounes A, Rasul MG, Amanullah MTO, Khan MMK. 2012.** *Fuzzy logic based environmental indicator for sustainability assessment of renewable energy system using life cycle assessment.* *Proc Eng* 49:35–41. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.109>
- Gauchez J. (1981).** *Etude hydrogéologique du plateau de Mostaganem (Algérie).* Thèse Doctorat 3ème cycle de géologie des ensembles sédimentaires. Tome 1. Univ. Lyon 1.
- Gentil L (1903).** *Etude géologique du bassin de la Tafna (Algérie).* Bull.sev.carte géologique, Algérie, Alger.

- Ghayoumian J, Ghermezcheshme B, Feiznia S, Noroozi A.A.** (2005). Intégrer les SIG et le DSS pour l'identification de zones appropriées pour la recharge artificielle, l'étude de cas Le bassin de Meimeh, Isfahan, l'Iran - *La géologie de l'environnement*, 47 (4) (2005), pp. 493–500.
- Gogolev, M. I.** (2002). Évaluation de la recharge des eaux souterraines avec deux technologies de modélisation de zones non saturées. *Environ. Geol.* 42(2-3), 248–258.
- Gogu R.C., Dassargues A., 2000** - Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assesment using overlay and index methods, *Environmental Geology*, 39 (6), April, Springer-Verlag.
- Goodchild Michael.F. 1992.** *Geographical Information Science*. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 6 (1), pp. 31-45.
- Goovaerts, P. (1997).** *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
- Greene R, Devillers R, Luther JE, Eddy BG. 2011.** *GIS-based multiple criteria decision analysis*. *Geogr Compass (Wiley)* 5(6):412–432
- Guide méthodologique de forage:** forages et prélèvements d'eau souterraine. DREAL Bretagne/BRGM. 2012. Documents d'incidence ouvrage et prélèvement <http://sigesbre.brgm.fr/>
- Hajjari T and Barkhordary M. 2007.** *Ranking fuzzy numbers by sign length*, First Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, Ferdowsi. University of Mashhad, Iran
- Hanss, M. (2002):** The transformation method for the simulation and analysis of systems with uncertain parameters. *Fuzzy Sets Syst.* 130(3), 277–289
- Hamza M.H., A. Added, R. Rodriguez, S. Abdeljaoued, A. Ben Mammou. 2007.** *A GISbased DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semiarid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia)*. *J. Environ. Manage.*, 84,
- Haouchine Abdelhamid, Boudoukha Abderrahmane, Haouchine Fatima Zohra, Nedjai Rachid. 2010.** Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride : Cas de la plaine d'El Outaya, Biskra, Algérie. *EUROJOURNALS*, 2010, 45 (4), pp.1-13. <halshs-00579048>.
- Hauser D, Tadikamalla P. 1996.** *The analytic hierarchy process in an uncertain environment: a simulation approach*. *Eur J Oper Res* 91(1):27–37. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00002-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00002-X)
- Huet Maryline. 2015.** Comparaison De Methodes D'estimation De La Recharge Des Aquiferes : Exemple De La Region Charlevoix - Haute-Cote-Nord. Mémoire. Université Du Québec. Chicoutimi. Page 94.
- Isabel D, Gelinas P, Aubre F. 1990.** *Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec*. *Rev Sc Tech Eau*; 23: 255-8.

- Ishibuchi, H., Nii, M. (2001):** Fuzzy regression using asymmetric fuzzy coefficients and fuzzified neural networks. *Fuzzy Sets Syst.* 119(2), 273–290
- Johnston K., VerHoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N. (2001).** Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI Inc. Redlands, California.
- Jourda J.P., Kouamé K. J., Adja M. G., Deh S. K., Anani A. T., Effini A. T., et Biémi J. 2007.** *Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-est de la Côte d’Ivoire) par la méthode DRASTIC.* Session Environnement/Eau, 11p.
- Kaufmann A, Gupta MM. 1988.** *Fuzzy mathematical models in engineering and management science.* Elsevier, Amsterdam, Netherlands
- Kêdowidé CMG. 2010.** *Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d’agriculture urbaine à Ouagadougou.* Vertigo. Revue électronique en sciences de l’environnement. 10(2). URL: <http://vertigo.revues.org/10368>; <https://doi.org/10.4000/vertigo.10368>
- Kouadio E.K. & al. (2008) :** prospection d'hydrogéologie dans la zone cristalline et métamorphique par analyse spatiale du potentiel de productivité. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.22 No.3 (2008), pp.373-390.
- Krishnamurthy J., Arul Mani, Jayaraman V. Et Manivel M. (2000) -** Groundwater resources development in hard rock terrain - an approach using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Geology*, vol. 2, n° 3-4, p. 204-215. DOI: 10.1016/S0303-2434(00)85015-1
- Krishnamurthy J., Venkatese Kumar N., Jayaraman V. Et Manivel M. (1996) -** An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 10, p. 1867-1884.
- Kumar Amit, Singh Pushpinder, Kaur Amarpreet. 2010.** Ranking of Generalized Exponential Fuzzy Numbers using Integral Value Approach. *Int. J. Advance. Soft Comput. Appl.*, Vol. 2, No. 2.
- Labib AW, O’Connor RF, Williams GB. 1998.** *Effective maintenance system using the analytic hierarchy process.* *Integr Manuf Syst* 9(2):87–98. <https://doi.org/10.1108/09576069810202005>
- Lallemand-Barrès A., 1994.** *Normalisation des critères d’établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions, Rapport BRGM R37929*, 15 p.
- Laroche A.M., Gallichand J., Theriault M. 1999.** *Estimation régionale de la recharge par un modele hydrologique ponctuel.* *Canadian Agricultural Engineering.* Vol. 41. No.1. January/February/March
- Larocque, M., Fortin, V., Pharand, M. C. & Rivard, C. (2010)** Groundwater contribution to river flows – using hydrograph separation, hydrological and hydrogeological models in a southern Quebec aquifer. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 7(5), 7809–7838.

- Laurencin Bernadette. 2008.** Les Systèmes d'Information Géographique. Arc View 9.1 et 3D analyst. SIG – Arc View 9.1. ENSA, Paris Belleville. http://www.paris-belleville.archi.fr/enseignants/hmo/Laurencin/BLaurencin_cours_SIG_VR.pdf
- Lerolle Y. 1973.** *Etude hydrogéologique de la nappe de Mostaganem – Modèle mathématique.* Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique – sous-direction des ressources en eau N°73.HYG.93.
- Levary RR, KeW. 1998.** *A simulation approach for handling uncertainty in the analytic hierarchy process.* Eur J Oper Res 106(1):116–122. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00134-3)
- Lidouh K. 2013.** *Integration of multi-criteria tools in geographical information system.* Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Bruxelles. Université libre de Bruxelles. 151 p
- Loquin, K., Dubois, D. (2010):** Kriging and epistemic uncertainty: a critical discussion. In: Jeansoulin, R., Papini, O., Prade, H., Schockaert, S. (eds.) *Methods for Handling Imperfect Spatial Information.* STUDFUZZ, vol. 256, pp. 269–305. Springer, Heidelberg.
- Loquin, K., Dubois, D. (2012):** A fuzzy interval analysis approach to kriging with ill-known variogram and data. *Soft Comput.* 16(5), 769–784
- Luzolo LK. 2012.** *Les eaux souterraines: captage, exploitation et gestion.* Mémoire online. Université de Kinshasa
- Maguire, D.J., M.F. Goodchild & D.W. Rhind (Editors). 1991.** *Geographical Information Systems.* Wiley, New York. Volume 1. Principles. 649 p. Volume 2. Applications. 447 p
- Malczewski J. 2006.** *GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature.* Int J Geogr Inf Sci 20(7):703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Maréchal, A.,(1984).** Kriging seismic data in the presence of faults. In: Verly, G., David, M., Journel, A.G. and Maréchal, A., Editors (1984). *Geostatistics for Natural Resources Characterization NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, Part 1* vol. 122, D. ReidelPubl, Dordrecht, Netherlands.
- Mcintyre C, Parfitt MK. 1998.** *Decision support system for residential land development site selection process.* J Arch Eng ASCE 4(4):125–131
- Merabli H. 2008.** *Etude des systèmes flous à intervalle.* Thèse Magister en Science, Dep D'électronique. Univ Constantine, 49 p
- Misstear. (2000).** *Évaluation de la recharge des eaux souterraines: un élément clé de la gestion du bassin hydrographique* January 2000.
- Mohamed R. M. 2001.** *Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC.* Sciences et changement planétaires / sécheresse, vol. 12, n°2, pp. 95-101.
- Moore Ramon.E, 1966.** *Interval Analysis.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. Science Magazine, Vol. 158. no. 3799, p. 365.

- Moza Morgan**, Ghosn Alexis. **2013**. *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie*. Publication: Etudes et analyse. IPEMED, 100 Boulevard du Montparnasse, 75014 Paris - France.
- Musy A. ; Soutter, M.** (1991). *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335 p.
- Moyeed R.A., Papritz A., (2002)**. An empirical comparison of kriging methods for nonlinear spatial point prediction. *Mathematical geology*, vol. 34, n°4, 365-386.
- Myrand D., 2008**. *Guide technique captage d'eau souterraine pour des résidences isolées*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. ISBN : 978-2-550-51418-3.
- OFEFP** (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage); **2003**. *Eaux Souterraines*. Exposition itinérante «GRUNDWASSER – ein Schatz auf Reisen ». Année internationale de l'eau douce, lancée par les Nations Unies.
- Paek JH, Lee YW, Napier TR. 1992**. *Selection of design/build proposal using fuzzylogic system*. *J Constr Eng Manag* 118(2):303–317. [https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9364\(1992\)118:2\(303\)](https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9364(1992)118:2(303))
- Paradina N., Araghi M A. 2008**. *Ranking of Fuzzy Numbers by Distance Method*. *Journal of Applied Mathematics, Islamic Azad University of Lahijan*. Vol.5, No.19.
- Pennober Gwenaelle, Odon Olivier, Join Jean-Lambert and Folio J-L. 2004**. *Spatial Analysis Approach of Feasibility of Groundwater Capture in the "Massif de la Fournaise*. *Cybergeog : European Journal of Geography*. DOI: 10.4000/cybergeog.3298. Source: OAI.
- Perrodon A. 1957**. *Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidental*. *Mém. Serv. Carte géol. Algérie. Nouvelle série, n°12, Alger*, 343 p.
- Prévil C, Thériault M, Rouffignat J. 2003**. *Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel ?* *Cahiers de géographie du Québec* 47(130):35–61 <http://www.erudit.org/revue/cgq/2003/v47/n130/007968ar.html>
- Quiroz Londoño OM, Romanelli A, Lima ML, Massone HE, Martínez DE. 2016**. *Fuzzy logic-based assessment for mapping potential infiltration areas in low-gradient watersheds*. *J Environ Manag* 176:1–168
- Raj PA, Kumar DN. 1999**. *Ranking alternatives with fuzzy weights using maximizing set and minimizing set*. *Fuzzy Sets Syst* 105:365–375
- Reshmidevi TV, Eldho TI, Jana R. 2009**. *A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds*. *Agric Syst* 101(1–2):101–109. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2009.04.001>
- Rivard, C., Lefebvre, R. & Paradis, D. 2014**. Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environ. Earth Sci.* 71(3), 1389–1408.

- Rodhe A. et Bockgard N. 2006.** Recharge d'eau souterraine dans un aquifère dur: un modèle conceptuel comprenant des effets de chargement de surface. *Journal d'hydrologie*, vol. 330, n° 3-4, p. 389-401.
- Saaty TL. 1980.** *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York
- Saibi Hakim, Ehara Sachio. 2008.** Hydrogeology and vulnerability assessment of groundwater resources in the mostaganem plateau, northwestern Algeria. *Journal of Environmental Hydrology*. Vol. 1, p16.
- Saibi, H. 2000.** Contribution a l'étude hydrogéologique du plateau de Mostaganem (Nord-ouest Algérien), Approche de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC: Bachelor Thesis, Faculty of Earth Sciences, University of Science and Technology Houari Boumedienne, Algiers, Algeria (in French), 158 p.
- Saneifard R and Nahid S. 2013.** *A new parametric method for ranking fuzzy numbers based on positive and negative ideal solutions*. *Int J Industrial Mathematics* (ISSN 2008–5621).5(2), Art ID IJIM-00330, 10 p
- Saporta Gilbert. (2006).** Probabilités, analyse des données et statistique. Edition Technique. 622p.
- Sbargoud Saida. 2013.** *Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Nord d'Algérie)*. Géotunis2013.
- Sbili L. 2015.** *Segmentation des images par classification floue*. Thèse Magister en Automatique. Génie électronique et informatique. Univ Tizi Ouzou. 73 p.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. & Cook, P. G. (2002).** Choisir des techniques appropriées pour quantifier la recharge des eaux souterraines. *Hydrogeol. J.* 10(1), 18–39.
- Schafer G., 1976.** *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton N.J.
- Schnebelen N., Platel J. P., Lenindre Y. et Baudry D. 2002.** *Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine Année 5, Opération Sectorielle, Protection De La Nappe De L'oligocène En Région Bordelaise*, Rapport BRGM/ Rp-51178, France, SI : BRGM, 2002.
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C. 2006.** Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol J* 14:433–443.
- Sinan Mohamed, Bouibrine Najoua. 2007.** *Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc)*. Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable. Rabat, Maroc.
- Sinan Mohamed, Maslouhi Rachid, Razack Moumtaz. 2003.** *Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc*. 2nd FIG Regional. Confrence Marrakech, Morocco.

- Singh P. 2015.** *A Novel Method for Ranking Generalized Fuzzy Numbers.* Journal of information science and engineering. Vol. 31, pp 1373-1385.
- Sophocleous M.,** (2004). Rechargement des eaux souterraines et budgets de l'eau des hautes plaines du Kansas Et aquifères connexes. Bulletin Géologique du Kansas Bulletin 249. 102 p.
- Soulsby David. 2012.** *Revue technique: réalisation et réhabilitation de forages dans les conditions du terrain.* Comité International de la Croix-Rouge, 19, avenue de la Paix 1202 Genève, Suisse. www.cicr.org © CICR, mars 2012. 149pages.
- Stephens, D. B.** (2009). Considérez également la recharge. Eau souterraine 47(1), 2–3.
- Tang MT, Tzeng GH, Wang SW. 1999.** *A hierarchy fuzzy MCDM method for studying electronic marketing strategies in the information service industry.* J Int Inf Manage 8(1):1–22
- Teng JY, Tzeng GH. 1996.** *Fuzzy multicriteria ranking of urban transportation investment alternatives.* Transp Plann Technol 20(1):15–31
- Thomas G (1985) :** Géodynamique du bassin Intra-Montagneux le bassin du bas Chélif occidental durant le Mio-Pliocène, Quaternaire, thèse doctorat es- sciences Paris.
- Tiab K. 1999.** *Hydrochimie des eaux du plateau de Mostaganem.* Mémoire d'ingénieur d'Etat en hydrogéologie, Science de la terre. Univ Oran, 79 p.
- Trabelsi Nadia, Zairi Moncef, Triki Ibtissem, Ben Dhia Hamed. 2006.** *Contribution d'un SIG à la gestion des ressources en eaux souterraines: Cas de la nappe profonde de Sfax, Tunisie.*
- TrikiIbtissem, HentatiImen, Trabelsi Nadia, Zairi Moncef. (2014).** Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la piézométrie à l'aide de l'extension GeostatisticalAnalyst d'ArcGIS: Cas du système aquifère phréatique de Sfax (Tunisie). Géomatique Expert; N° 99.
- U.S.G.S:** U.S. Geological Survey (Institut d'études géologiques des États-Unis). <https://water.usgs.gov/edu/watercyclefrench.html>
- Vrba J, Alexander Z, International Association of Hydrogeologists (IAH). 1994.** *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, vol 16. H Heise, Hannover 131p. ISBN 3922705979
- Vries, J. J., Simmers, I.** (2002). Recharge des eaux souterraines: un aperçu des processus et des défis. Hydrogeol. J. 10(1), 5–17.
- Wanko Adrien. 2016.** *Gestion des eaux souterraines - Définitions et concepts.* Hydrogeology & Constructed Wetland. ENGEES / ICUBE.
- Yardimci A, Muhammetoglu A, Oguz H. 2005.** *A fuzzy logic application to environment management system: a case study for Goksu streams water quality assesment.* Computational Intelligence, Theory and Applications. Adv Softw Comput 33:327–338. https://doi.org/10.1007/3-540-31182-3_30

- Yin, L., Hu, G., Huang, J., Wen, D., Dong, J., Wang, X. et Li, H.** (2011). Recharge d'eau souterraine -Estimation dans le plateau d'Ordos, en Chine: comparaison de méthodes. *Hydrogeol. J.* 19 (8), 1563-1575.
- Younsi FZ, Hamdadou D, Beldjilali B.** 2009. Proposition d'un Système Interactif d'Aide à la Décision Spatiale : Télédétection, SIG et Analyse Multicritère. Communication avec acte dans la 2ème Conférence Internationale sur l'Informatique et ses Applications (CIIA'09). Algérie.
- Zadeh L.A.** 1965. *Fuzzy Sets*. Information and control, 8, pp. 338-353.
- Zadeh, L. A.** 1978. *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. Fuzzy Sets and Systems. Vol. 1, pp: 3–28.
- Zaporozec A., and Vrba J.,** 1994 – Classification and review of groundwater and vulnerability maps. In Vrba and Zaporozec (Editors), *Guidebook on mapping Groundwater vulnerability*. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp.21-19.
- Zarghami M, Ferenc S.** 2011. *Multicriteria analysis: application to water and environment management*. Springer, Berlin, 170 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17937-2>
- Zimmermann H. J. and Zysno P.** 1980. *Latent connectives. Human decision making*. Fuzzy sets and systems. Vol.4, N° (1), pp 37–51. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(80\)90062-7](https://doi.org/10.1016/0165-0114(80)90062-7).
- Zimmermann, H.J.** 1985. *Fuzzy set theory and its application*. Kluwer Academic Pub., ISBN 13: [9780898381504](https://www.isbn-international.org/number/9780898381504)

<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-overlay-works.htm>

<http://www.esrifrance.fr/arcgis.aspx>

<http://www.sig-geomatique.fr/sig-sig.html>

<https://actudactuaire.typepad.com/laboratoire/2016/08/logique-floue.html>

Annexes

Annexe A

Estimation de la recharge potentielle de la nappe du
plateau de Mostaganem

A.1 Introduction

La wilaya de Mostaganem est caractérisée par un climat méditerranéen à caractère semi-aride. Les précipitations étant faibles, cette région dispose de ressources en eau renouvelables limitées. En parallèle, le développement des activités industrielles et agricoles et l'extension des périmètres irrigués en particulier, n'ont pas été sans conséquences sur l'environnement en général et sur la ressource en eau plus particulièrement. En effet, l'implantation de zones urbaines de plus en plus importantes accompagnées de zones industrielles et un développement accru de l'activité agricole est à la base d'une dégradation de la ressource en eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

Face à cette situation, établir une évaluation et asseoir une gestion optimale des ressources en eaux souterraines dans cette zone sont devenues indispensables. Afin d'y parvenir, les gestionnaires des ressources en eau ont besoin d'informations très précises sur les conditions de recharge et d'utilisation au niveau de chaque bassin hydrogéologique. Cependant, l'évaluation de la recharge des nappes phréatiques est un paramètre difficile à estimer et pour cela différentes approches ont été envisagées (Sophocleous, 2004).

Dans ce chapitre on propose une analyse spatiale pour l'évaluation de la recharge potentielle du plateau de Mostaganem. Cette étude repose sur la définition des paramètres régissant l'infiltration, leurs degrés d'influence et les relations éventuelles qui existent entre eux. Chaque facteur est étudié indépendamment, et au final, tous les paramètres seront intégrés et compilés pour aboutir à une carte-synthèse de la recharge potentielle.

Tous les paramètres régissant l'infiltration ont une composante spatiale, de ce fait, l'information véhiculée par ces paramètres peut être stockée, analysée et visualisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique. En effet, grâce à l'outil SIG, le traitement, des cartes topographiques, géologiques, hydrogéologique et l'analyse des données sur les précipitations de la région d'étude a permis de dégager différentes couches d'informations spatialisées et classifiées selon le degré d'infiltration des eaux de pluies, à savoir: la lithologie, la pente, le type de sol, l'occupation du sol et le réseau hydrographique. L'agrégation de ces différentes couches de données, a permis d'établir une carte synthèse de la recharge du plateau de Mostaganem.

A.2 Recharge des nappes souterraines

A.2.1 Définition de la recharge

En général, la recharge correspond au volume d'eau qui atteint la nappe phréatique et forme un réservoir d'eau souterraine qui se reconstitue (Scanlon *et al.*, 2002; Vries and Simmers, 2002). Une partie des précipitations s'infiltré et recharge l'aquifère. Une partie des précipitations peut

également être perdue par ruissellement (en surface ou sous terre) et/ou par évapotranspiration, Il y a aussi des échanges entre les eaux souterraines et les cours d'eau.

Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à la charge du cours d'eau, l'eau souterraine se déverse vers le cours d'eau. Et Vice_versa, les cours d'eau rechargent les réservoirs souterrains lorsque leur charge dépasse celle de l'aquifère.

A.2.2 Types de recharge

On distingue deux types de recharge de l'aquifère:

- La recharge directe, à partir des précipitations et de l'irrigation. Elle se produit sur de vastes régions spatiales.
- La recharge indirecte plus locale se produisant à partir de la surface topographique par les rivières ou les lacs ou par le ruissellement de surface (infiltration des eaux de ruissellement du bassin en amont).

On distingue, également la recharge potentielle de la recharge réelle ou nette. La première représente la quantité totale d'eau qui s'est infiltrée et qui n'atteint pas nécessairement la nappe phréatique. La deuxième représente plutôt la quantité d'eau qui atteint la nappe après avoir soustrait des précipitations les phénomènes de ruissellement hypodermique, d'ETR (évapotranspiration réelle) et autres processus causant une perte.

A.3 Méthodes d'estimation de la recharge

Dans le domaine de l'exploitation des eaux souterraines, plusieurs études sont faites pour l'estimation de la recharge des aquifères qui représente un paramètre très important pour une gestion optimale des ressources en eau. Cependant, ce paramètre reste toujours difficile à estimer d'une façon précise.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent l'évaluation de la recharge d'un aquifère, les plus importantes sans brièvement présentées dans cette section.

A.3.1 Approche de bilan hydrique

Ces approches de bilan hydrique sont basées sur la loi de conservation de la masse dans le cycle de l'eau. La différence entre l'eau entrant et sortant du système correspond à la variation du stockage de l'eau dans les réservoirs. Tous les autres termes étant calculés, la recharge est donc obtenue à partir de la différence.

La façon la plus courante de créer un bilan hydrique consiste à utiliser des modèles hydrologiques tels que : HYDROTEL, SWAT, HELP, CEQUEAU ou MOHYSE [Arnold & Allen, 1999 ; Lefebvre et al., 2009, Croteau et al., 2010; Larocque et al., 2010].

A.3.2 Approche par infiltrométrie et lysimétrie

L'infiltrométrie et lysimétrie (Heppner et al., 2007 ; Risser et al., 2009) sont des mesures locales directes de l'infiltration verticale en fonction du temps. Ces techniques sont réalisées à différents endroits et permettent d'estimer les variations spatiales de la recharge. Cependant, ces systèmes induisent certaines perturbations du sol et des courants qui modifient le processus de recharge. De plus, ces approches sont associées à des coûts de recherche élevés.

A.3.3 Approche par le suivi du niveau de la nappe

L'estimation de la recharge par la surveillance du niveau des eaux souterraines est la plus couramment utilisée, en particulier dans le contexte des eaux souterraines peu profondes. C'est une approche facile, simple et peu coûteuse (Healy & Cook, 2002 ; Yin, 2011). La limite de cette méthode réside dans la difficulté d'estimer le coefficient spécifique de d'emmagasinement, qui contrôle directement l'estimation de la recharge. Cette méthode tient également compte du fait que toute élévation du niveau de la nappe phréatique est due à la recharge. Cependant, cette hypothèse est principalement remise en cause par des phénomènes de pompage ou d'évapotranspiration.

A.3.4 Approche par hydrogramme

Les analyses d'hydrogrammes des cours d'eau aident à évaluer la contribution des eaux souterraines aux cours d'eau. L'étude des hydrogrammes consiste en la séparation et l'interprétation des débits de base ou l'analyse des périodes de récession. Ensuite, il est possible d'estimer la recharge sous l'hypothèse que la décharge des eaux souterraines est égale à la recharge (Brodie & Hostetler, 2005; Bredehoeft, 2007).

A.3.5 Approche analytique

Il existe également des approches analytiques. L'une de ces méthodes, basée sur un modèle d'écoulement horizontal de Dupuit-Forchheimer (Dupuit, 1863), a été testée pour l'évaluation de la recharge régionale d'un aquifère cristallin à une nappe libre du bouclier géologique du Canada (Chesnaux, 2013). Cette approche nécessite un suivi piézométrique dans un profil horizontal et une échelle de temps uniforme. Cependant, les hypothèses de base sont limitatives (homogénéité et isotropie du système aquifère, référentiel de base de l'aquifère) et jouent un rôle important dans la détermination de la valeur de la conductivité hydraulique et de la recharge.

A.3.6 Approche de traçage

Il y a également des méthodes de traçage (Vries & Simmers, 2002 ; Flint et al., 2002). En général, elles sont coûteuses et valables pour de petites zones (Scanlon et al., 2002). Les mesures

isotopiques fournissent plus d'informations sur l'origine de l'eau qui constitue la recharge. Estimer la recharge avec cette méthode est difficile. Le tracage par la chaleur est très coûteux compte tenu de l'équipement nécessaire à la recherche. Les traceurs historiques comme le couple tritium/hélium ou CFC (chlorofluorocarbures) ainsi que les traceurs environnementaux (CMB, bilan de masse de chlorure) sont également utilisés pour déterminer l'âge de l'eau et donc de la recharge localement et à long terme (sur les 50 dernières années).

A.3.7 Approche par modélisation numérique en zone non saturée

La modélisation des zones non saturées tente de résoudre l'équation de Richards (Richards, 1961). Parmi les logiciels, les plus utilisés on trouve : UNSATH, VS2DT, HYDRUS 2D (Scanlon et al., 2002). Les modèles numériques créés avec ces logiciels nécessitent des observations de terrain pour être validés. La zone d'étude est limitée (<100 m²). Scanlon (2002) a souligné que l'imprécision des valeurs de conductivité hydraulique et l'hystérésis entre la conductivité hydraulique, la teneur en eau et la hauteur de pression sont la source d'incertitudes importantes.

A.3.8 Approche par modélisation numérique en zone saturée

La modélisation numérique dans les zones saturées est également un outil intéressant et largement utilisé (Gogolev, 2002 ; Gandolfi et al. 2006; Carrera hernandez et al. 2012). La valeur de recharge est généralement déterminée en calibrant un modèle numérique (Sanford, 2002). La fiabilité de l'évaluation de la recharge est fortement liée à la conductivité hydraulique.

Cependant, cette dernière méthode varie souvent de plusieurs ordres de grandeur. Par conséquent, la valeur de recharge estimée par le modèle numérique est ambiguë. En régime permanent, la valeur de la recharge ne change pas. Le régime transitoire permet de simuler les fluctuations transitoires de remplissage pour des valeurs fixes de conductivité hydraulique. Cette méthode permet une meilleure limitation de la valeur de la recharge (Scanlon et al., 2002).

Une section spéciale sur le thème est présentée en 2002 dans le « hydrogeology Journal ». Cette section présente les différents problèmes et avancées des différentes méthodes d'estimation de recharge. L'article de Scanlon (2002) constitue un bon guide des divers méthodes existantes et de leurs spécificités. Il identifie les critères à considérer ainsi que l'approche à adopter afin de sélectionner la méthode la plus appropriée pour le domaine d'études choisi.

Cependant, il est difficile de choisir entre ces nombreuses méthodes pour sélectionner celle qui convient le mieux à un système aquifère particulier.

Les paramètres climatiques, géologiques et géomorphologiques contrôlent largement la régénération à tous points de vue et jouent donc un rôle important dans le choix de la technique à utiliser (Gogolev 2002 ; Scanlon et al., 2002).

Il faut pas oublier, la complexité de mise en œuvre des différentes méthodes non plus, ses coûts, la durée de l'enquête, son efficacité selon le domaine d'étude ou la disponibilité des données en termes de qualité et de quantité (Yin et al., 2011). Compte tenu des nombreux facteurs contraignant la recharge, celle-ci reste la composante du système d'eau souterraine la plus difficile à estimer (Stephens, 2008).

Les tableaux A.1 et A.2 présentent un inventaire sur les études et les méthodes d'estimation de la recharge faites au cours des 20 dernières années.

Auteur	méthodes	lieux	Durée d'investigation (an)	climat
Sophocleous, 1991	1,2	USA (kansas)		Semi aride
Arnold et allen, 1999	3,4,6.1	USA(Mississippi)	30	Subtropical
Chen et lee, 2003	3,4	Chine (Taiwan)	57	Tropical
Flint et al., 2002	2,5,7,9.1,13,14	USA (Nevada)	Très variable selon les méthodes 27 à 33	Aride –Semi aride
Risser et al., 2005	1,3,4,6.2,9.2	USA (Pennsylvanie)		Aride
Coes et al., 2007	1,3,5,8	USA (Caroline du Sud)	1 à 17 selon les méthodes	Subtropical - Humide
Delin et al., 2007	1,4,6.4,8,9.3	USA (Minnesota)	5 à 59 selon les méthodes	Humide
Lee et al., 2006	1,2	Taiwan	Long terme	Tropical
Heppner et al., 2007	1,9.2	USA (Pennsylvanie)	6	Aride
Manghi et al., 2009	2	USA (Californie)	28	Aride
Laroque et al., 2010	3,6.6	Canada (Québec)	15	Humide
Croteau et al., 2010	6.2	Canada (Québec)	39	Humide
Yin et al., 2011	1,2,5	Chine (Ordo plateau)	4 à 24	Semi aride
Lie et al., 2011	1,6.3	Allemagne	11	Humide
Lefebvre et al., 2011	1,2,6.5	Canada (Québec)	9	Humide
Rivard et al., 2014	2,3,6.2,13	Canada (Québec)	30 à 93	Humide

Tableau A. 1. Inventaire d'études et méthodes d'estimation de la recharge faites au cours des 20 dernières années (Huet M., 2015).

Méthodes
1 WTF
2 Bilan hydrologique
3 Séparation d'hydrogrammes
4 Méthode RORA
5 Loi de Darcy
6 Modèle bilan hydrologique
6.1 SWAT
6.2 HELP
6.3 PROMET
6.4 RRR
6.5 CEQEAU
6.6 MOHYSE
7 Méthode de traçage
8 Datation de l'eau
9 Physique des sols
9.1 Sonde à neutrons
9.2 Lysimétrie
9.3 Bilan zone non saturée
13 Modélisation numérique
14 Approche empirique

Tableau A. 2. Méthodes d'estimation de la recharge utilisée par les auteurs du Tableau B.1 (Huet M., 2015)

A.4 Importance de l'estimation de la recharge

Le calcul de la recharge permet, dans un premier temps, l'évaluation du renouvellement de la ressource en eau à l'échelle d'un aquifère (Scanlon und al.,2002). Il s'agit généralement d'études menées à grande échelle spatio-temporelle. Cette évaluation du stock de la nappe d'eau disponible contribue à l'élaboration de stratégies pour son utilisation durable à court et à long terme.

Au niveau local, l'évaluation de la recharge permet d'évaluer également la vulnérabilité d'un aquifère à la pollution. Les zones de forte recharge sont sensibles à la pollution, qui peut donc migrer rapidement à travers la zone non saturée.

Par ailleurs, des périmètres de protection des captages d'eau potable peuvent être définis sur la base d'études d'évaluation des zones de recharge préférentielles. En revanche, la localisation des zones de faible recharge permet d'évaluer les capacités potentielles d'une décharge pour le confinement des déchets (Flint et al., 2002). Cela nécessite des informations plus détaillées sur les variations spatiales de la recharge et des flux préférentiels.

A.5 Application au plateau de Mostaganem

A.5.1 Méthodologie adoptée

La méthodologie que nous avons adoptée dans cette thèse, pour l'estimation de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem, est une analyse spatiale qui permet de fournir une évaluation

de la recharge potentielle de la nappe. Cette analyse est basée sur la détermination des paramètres qui régissent l'infiltration. Elle suit deux principales étapes:

- La première étape consiste à déterminer et à étudier les différents paramètres qui influencent la recharge de l'aquifère.
- La deuxième étape consiste à croiser les informations spatiales relatives aux différents facteurs régissant la recharge, pour obtenir la carte synthèse de la recharge de la zone d'étude.

Chaque paramètre déterminé est étudié séparément et relativement apprécié par rapport aux autres paramètres. Une classification et une pondération sont ainsi définies pour chacun d'eux. Pour la classification, une note (allant de 1 à 10) est affectée à chaque classe. Pour la pondération, le taux de contribution de chaque paramètre est évalué et exprimé en «indice d'infiltration». On établit ensuite, une carte thématique pour chaque paramètre. Enfin, l'implémentation dans un SIG (établissement et superposition des cartes thématiques des paramètres de la recharge) permettra d'établir une carte synthèse de la recharge de la zone d'étude.

A.5.2 Facteurs influençant la recharge

Différents paramètres régissent le calcul de la recharge des aquifères. Les paramètres les plus couramment utilisés dans la littérature (Kouadio et al., 2008 ; Musy et Soutter, 1991) sont les paramètres suivants : la lithologie, la nature du sol, le couvert végétal, la nature du relief (pente), le réseau hydrographique caractérisant la zone d'étude (densité de drainage). Le schéma suivant représente les principaux facteurs qui régissent l'infiltration (Haouchine et al., 2010) :

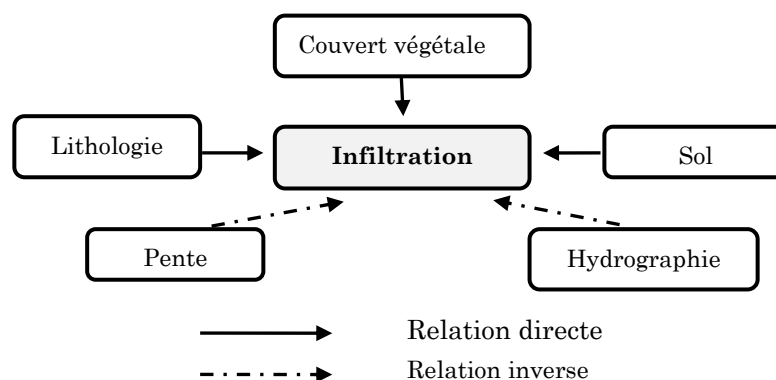


Figure A. 1. Principaux facteurs régissant l'infiltration

La recharge varie également suivant l'épaisseur de la zone vadose (zone non saturée) (Flint et al, 2002). En région humide, la recharge est particulièrement limitée par la capacité de l'aquifère à stocker ou à transporter l'eau, tandis que dans les régions plus sèches la recharge dépend surtout

des événements pluviométriques de forte intensité, dans le cas où les précipitations sont supérieures à l'ETR (Scanlon et al, 2002; Vries & Simmers, 2002; Misstear, 2000).

Facteurs	Propriétés hydrogéologiques régissant le potentiel de recharge
Lithologie	Compacité de la roche, état d'altération, présence de diaclase et de joint sur les roches sub-affleurantes ou affleurantes. Les zones caractérisées par des roches moins compacte et une arène grenue épaisse sont plus favorables à l'infiltration que les roches compactes (Krishnamurthy J. et al., 1996,2000).
Drainage	Densité de drainage en longueur totale ou en nombre de drains par unité de surface. En milieu de socle, la fracturation intervient fortement assez souvent sur l'orientation des segments du réseau hydrographique et sa forme générale (surtout lorsque les pentes sont fortes et les altérites peu épaisses). Dans ce cas, le réseau hydrographique indiquerait la présence de fractures créant des voies préférentielles d'infiltration. Le réseau de drainage est utilisé comme critère d'évaluation des propriétés de recharge des aquifères fracturés par de nombreux auteurs, comme Krishnamurthy J. et al. (1996,2000), Shaban A. et al. (2006).
Occupation du sol	Densité et répartition géographique de la couverture végétale, présence de surfaces imperméables (bâtiments, industries, remblais, routes, etc.) par son influence sur l'état de surface et la structure du sol, la couverture végétale freine le ruissellement et favorise l'infiltration. En revanche, elle peut restituer beaucoup d'eau à l'atmosphère, par évaporation directe de l'eau interceptée par le feuillage et par transpiration de celle puisée par les racines. Mais c'est un facteur qui favorise le plus souvent la recharge.
Type de sol et épaisseur	Granulométrie et épaisseur des sols. En milieu de socle fracturé, la pénétration de l'eau dans les couches souterraines dépend essentiellement de la teneur en argile et l'épaisseur des sols. Les études de terrain et de laboratoire basé sur des approches hydrauliques et isotopiques montrent que les réponses rapides de la nappe se déroulent dans les secteurs à épaisseur de sol faible (Rodhe A. et Bockgard N., 2006 ; Bhuiyan C. et al., 2009). En revanche, si les formations superficielles sont épaisses, cela peut entraîner une diminution ou une retardation du processus d'infiltration, ce qui pourrait accroître les effets de l'évapotranspiration.
Pente	Le potentiel de recharge des aquifères est inversement proportionnel à la valeur des pentes. Sur pentes fortes, le ruissellement est favorisé, au détriment de l'infiltration. A l'inverse les pentes faibles favorisent l'infiltration (J.Krishnamurthy et al., 1996,2000 ; J.Ghayoumian et al., 2005).

Tableau A. 3. Description hydrogéologique des facteurs régissant la recharge

Généralement la recharge est favorisée lorsque le sol est pauvre en végétation (faible ETR), les pluies sont abondantes et bien réparties sur l'année hydrologique, le sol est perméable (gros grains ou substrat rocheux fracturé ou faille près de la surface), et lorsque le terrain a de faible pente (elle limite le ruissellement).

Le tableau A.3 synthétise les propriétés hydrogéologiques des différents facteurs influençant le potentiel de la recharge d'un aquifère.

A.5.3 Etude des facteurs régissant la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem

A.5.3.1 Etude du facteur sol

Les propriétés de la matrice du sol affectent les forces capillaires et l'adsorption, entraînant des forces de succion qui elles-mêmes influencent en partie l'infiltration.

De plus, la désagrégation de la surface du sol par les gouttes de pluie (batance) ou d'autres effets (thermiques et anthropiques) peut entraîner une détérioration de la structure de la couche supérieure du sol et la formation d'une croûte dense et étanche jusqu'à une certaine profondeur.

À titre indicatif, le tableau A.4 fournit des ordres de grandeur pour la conductivité hydraulique dans différents sols.

K(m/s)	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin, Limon grossier à limon argileux		Argile limoneux à argile homogène				
Possibilités d'infiltration	Excellentes		Bonnes		Moyennes à faibles		Faibles à nulles				

Tableau A. 4. Ordres de grandeur de la perméabilité dans différents sols (d'après Musy et Soutter (1991))

Quatre (04) grandes classes de sol ont été établies pour la zone d'étude. Cette classification est faite selon la perméabilité du sol. Plus le sol est imperméable, plus l'infiltration est faible et par conséquent la recharge est plus faible (voir tableau A.5).

Nature du sol	Classe selon perméabilité du sol	Superficie (km ²)	% surface totale
Gravier	Forte à moyenne	42,46	4,10
Sable Limons sableux	Moyenne	658,18 6,37	73,05 5,61
Limons Limons silteux	Faible	756,92 54,94	0,10 4,10
Argile	Très faible	117,34	73,05

Tableau A. 5. Classification des types de sol du plateau de Mostaganem

La figure A.2 représente les types de sol spécifique à la zone d'étude.

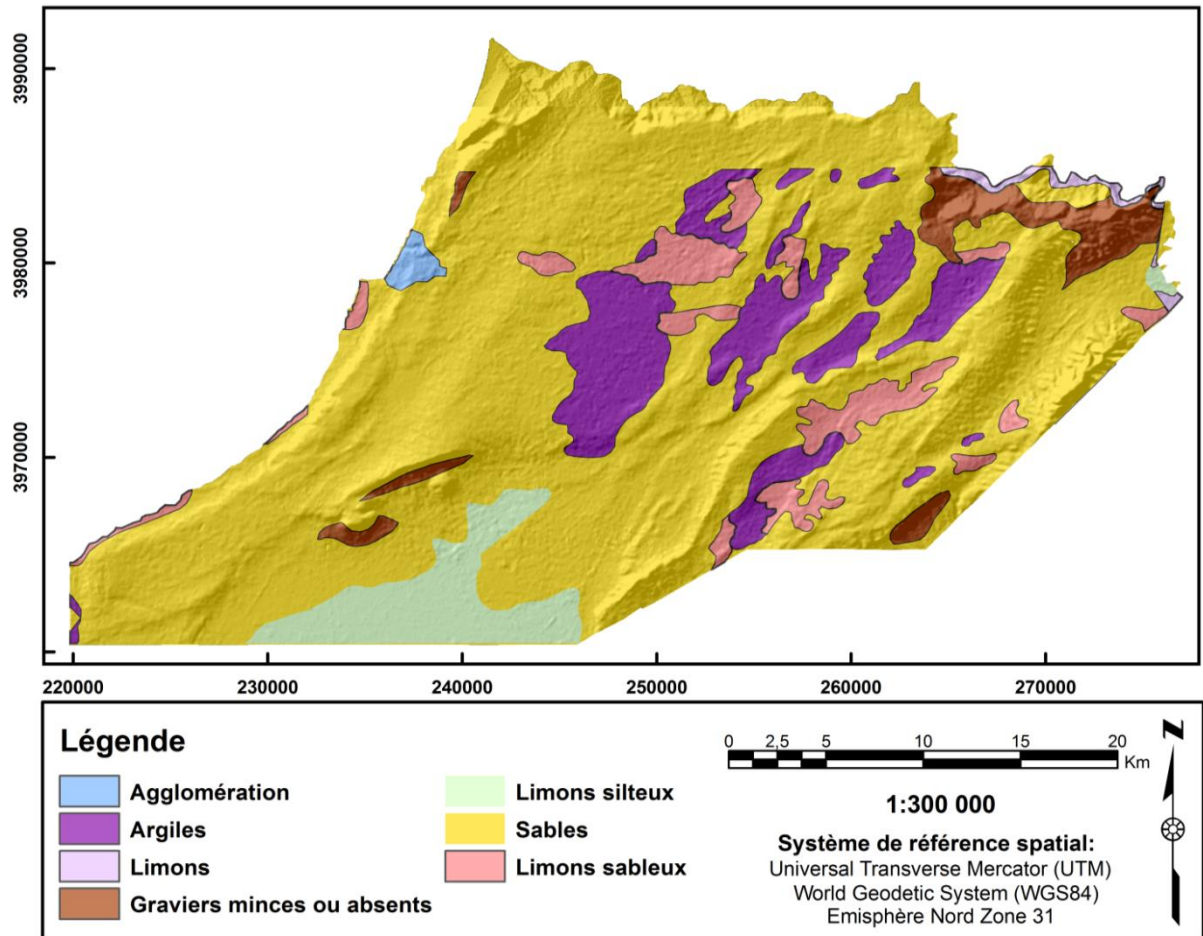


Figure A. 2. Carte thématique du facteur « sol ».

A.5.3.2 Etude du facteur lithologie

Le caractère lithologique des roches sujettes aux précipitations et de la couche superficielle du terrain est crucial car il détermine les processus d'infiltration et d'évaporation et donc la recharge des eaux souterraines. En effet, l'écoulement de l'eau de la surface vers la profondeur résulte de la porosité, de la perméabilité, de la compaction et du type de ciment entre les grains des roches en surface, c'est-à-dire de la connaissance du caractère lithologique de la zone d'étude. . (Kouadio et al., 2008).

La figure A.3 montre les différentes classes de lithologies rencontrées dans la zone d'étude.

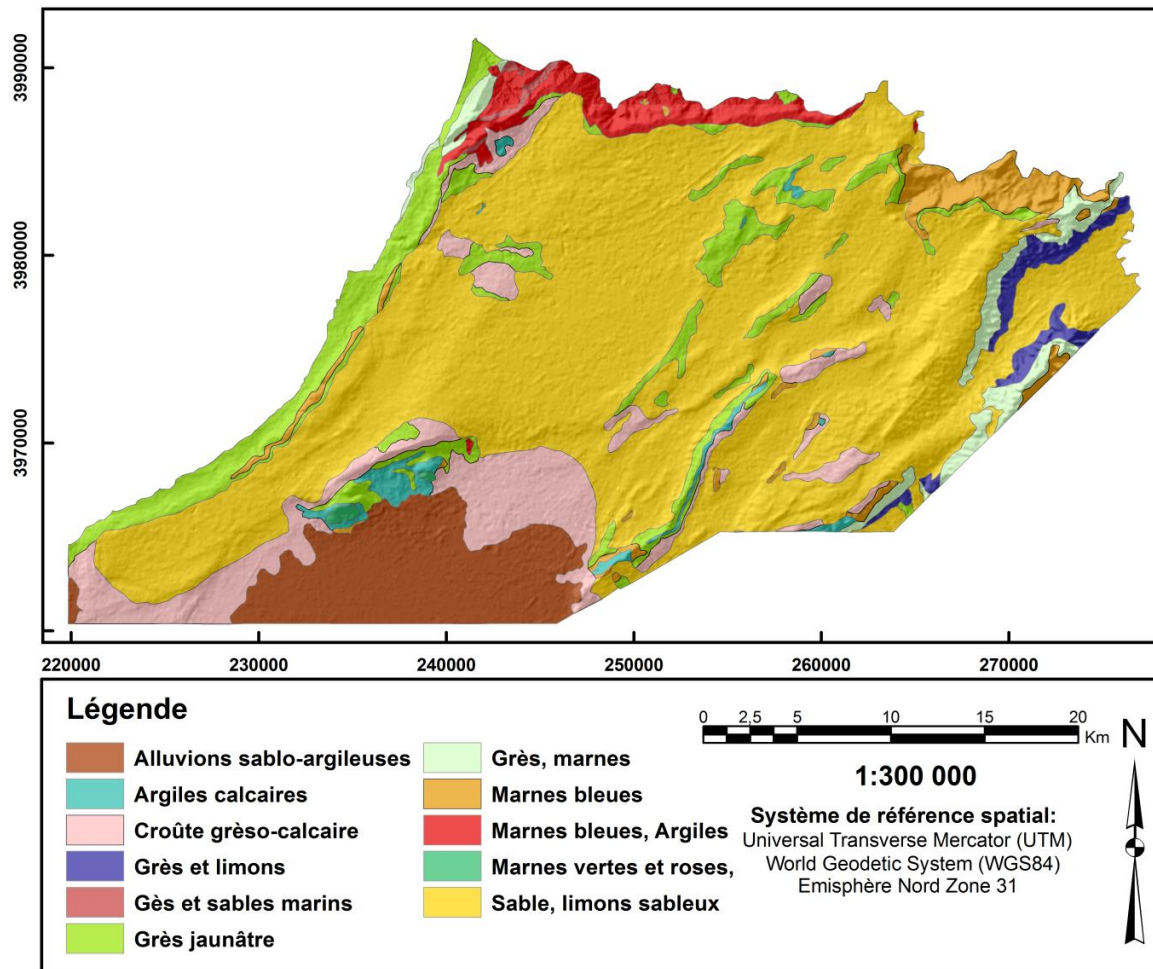


Figure A. 3. Carte thématique du facteur « Lithologie ».

Le tableau A.6 regroupe en quatre (04) classes les différentes lithologies de la zone d'étude, sélectionnées selon leurs perméabilités.

Lithologie	Perméabilité	Classes selon la perméabilité
Marnes bleues et Argiles/ Marnes vertes et roses/ Marnes bleues.	Très peu perméable	Très faible
Alluvions sablo-argileuses/ Argiles et calcaires/ Grès et marnes/ limons sableux / Grès et limons.	Peu perméable	Faible
Croûte grès-calcaire/ Grès jaunâtre/	Perméable	Moyenne
Grès et sables marins/ Sable,	Très perméable	Forte à moyenne

Tableau A. 6. Différentes classes de lithologie du plateau de Mostaganem

A.5.3.3 Etude du facteur pente

Une forte pente favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration. La réalisation de la carte thématique de ce facteur a nécessité l'établissement d'un modèle numérique de terrain (voir figure B.4). L'étude des valeurs de pente dans ce MNT nous a permis de déterminer trois (03) classes de pente (α) qui caractérisent la zone d'étude, comme le montre la figure A.4.

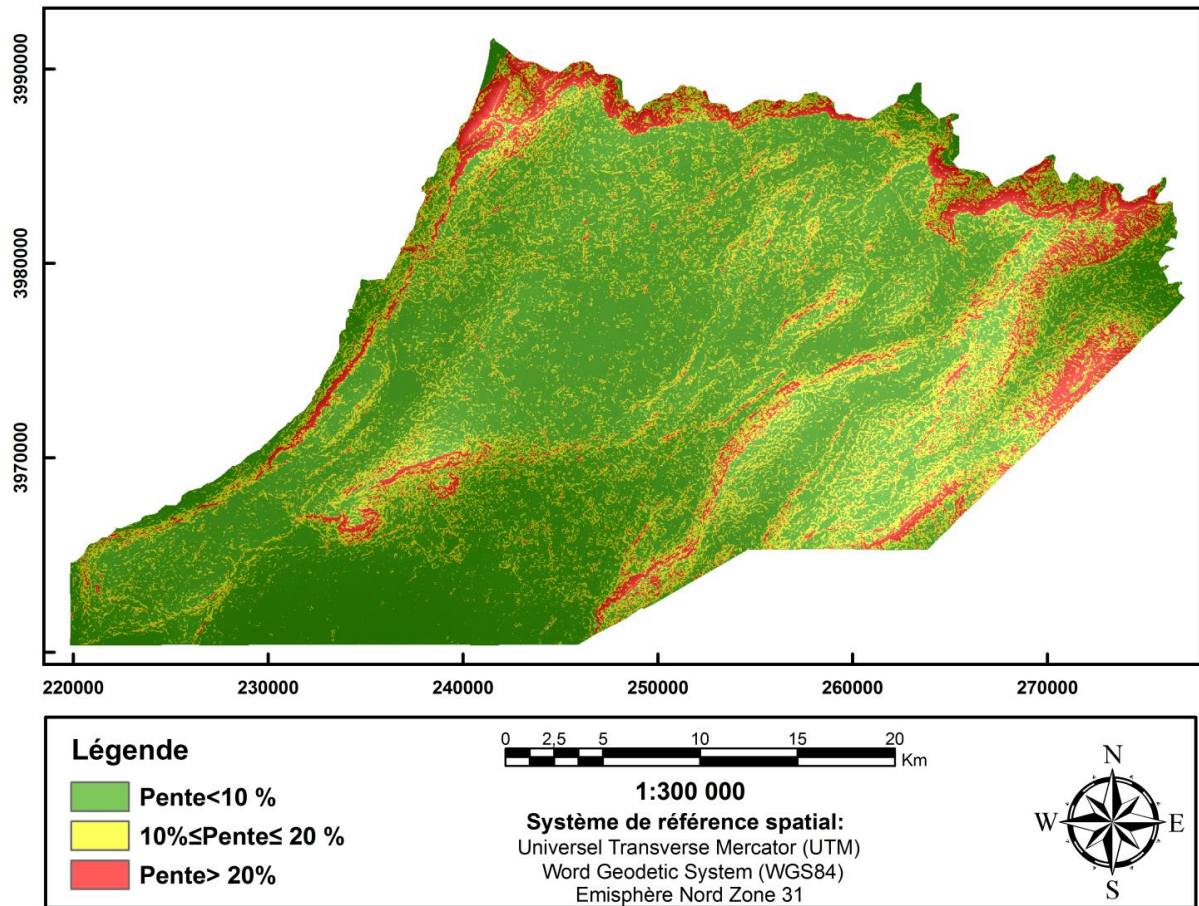


Figure A. 4. Carte thématique du facteur « pente »

- Classe I : α de 0 à 10% (faible) : C'est la classe des basses plaines. Elle occupe la majorité du plateau de Mostaganem. Les pentes y sont très faibles, d'où le nom du plateau.
- Classe II : $10 \leq \alpha \leq 20$ % (moyenne) : Cette classe correspond aux zones de piedmonts. Le ruissellement perdrait de son ampleur et c'est l'infiltration qui commencerait à avoir lieu.
- Classe III: pente $\alpha > 20\%$ (forte) : Les valeurs de cette classe représentent les zones montagneuses (Dj. Kharouba, Dj. Mekhalia, Dj. Trek et Touires, Dj. Mouzaia, etc), où le ruissellement serait très important, impliquant une infiltration minime.

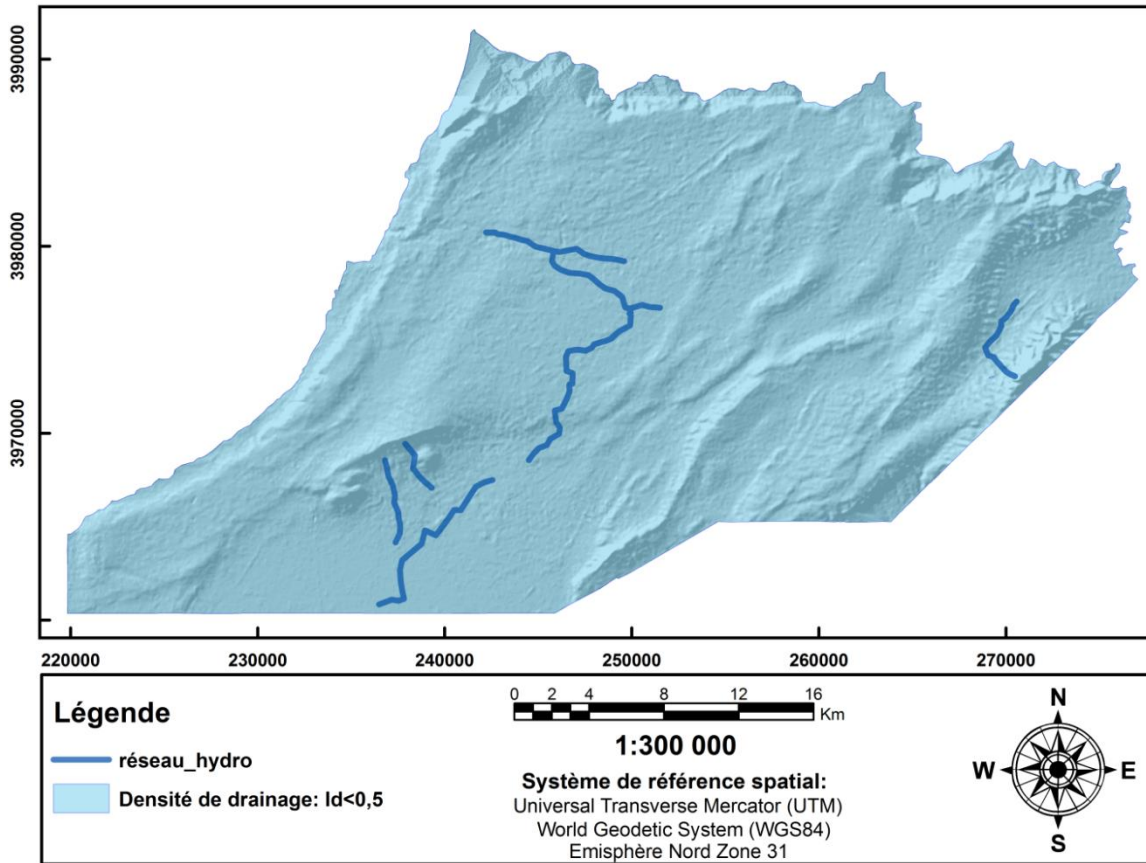
Le tableau A.7 présente une classification des pentes selon leur influence sur la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol.

Valeur de la pente α (%)	Classes selon l'effet sur l'infiltration
$\alpha < 10$	Forte
$10 < \alpha < 20$	Moyenne
$20 < \alpha$	Faible

Tableau A. 7. Classification des pentes selon leur influence sur l'infiltration

A.5.3.4 Etude du facteur réseau hydrographique

La forme et la densité du réseau d'eau permettent de tirer des conclusions importantes sur le ruissellement et l'infiltration de l'eau. Plus la densité du réseau ainsi que le ruissellement sont faibles, notamment dans les plaines et les dépressions, plus l'infiltration est favorable.



Figure

A. 5. Carte thématique du facteur « réseau hydrographique »

La densité de drainage (I_d) des cours d'eau est calculée à partir de la carte topographique relative à la zone d'étude selon la relation suivante:

$$\text{Densité de drainage} = \text{longueur du cours d'eau} / \text{surface du bassin versant} \quad (\text{A.1})$$

Le calcul de la densité de drainage de la zone d'étude a révélé une densité $I_d < 0,5$. Cette faible valeur est justifiée par la présence modeste des cours d'eau sur le plateau. Ainsi, une seule classe est déterminée pour la zone d'étude (voir tableau A.8).

Densité de drainage (I_d)	Classe selon l'effet sur l'infiltration
$I_d < 0,5$	Forte à moyenne

Tableau A. 8. Classes de densité de drainage

A.5.3.5 Etude du facteur couvert végétal et occupation du sol (CV & OS)

La couverture végétale et l'occupation du sol jouent un rôle important dans l'évaluation de la recharge d'un aquifère. Le couvert végétal freine le ruissellement et favorise l'infiltration.

La carte d'occupation des sols (B.N.E.D.E.R, 2011), fournie à l'échelle 1/25000 avec une précision inférieure à 6,25 ha, nous permet de définir les types de végétations et d'occupation des sols suivants :

Forêt - maquis - reboisement

Dans cette classe ils sont regroupés :

- Les forêts : formations végétales principalement constituées d'arbres, de buissons et d'arbustes.
- Les maquis : formations forestières basses et fermées ; composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées.
- Les reboisements ainsi que les zones touchées par des incendies récents.

Zone à sol nu - à affleurements rocheux

Cette classe concerne les sols nus ou recouverts par une végétation herbacée ou autre avec un taux de recouvrement inférieur à 15%. Elle concerne aussi les regs, les éboulis, les falaises, les affleurements rocheux et les zones affectées par l'érosion intense.

Zone de parcours

Cette classe comprend tous les parcours steppiques et Sahariens. Les défrichements sont associés à cette classe.

Agglomération

Cette classe concerne les agglomérations et bâtis.

Zones agricoles

Cette classe concerne toutes les surfaces occupées par: les vignes, arbres ou d'arbustes fruitiers, les cultures légumières de pleins champs ou sous serre, les céréales (blé dur, blé tendre, cultures fourragères sous toutes ses formes) les cultures industrielles, les légumes secs, etc. Ces cultures sont irriguées en permanence ou périodiquement.

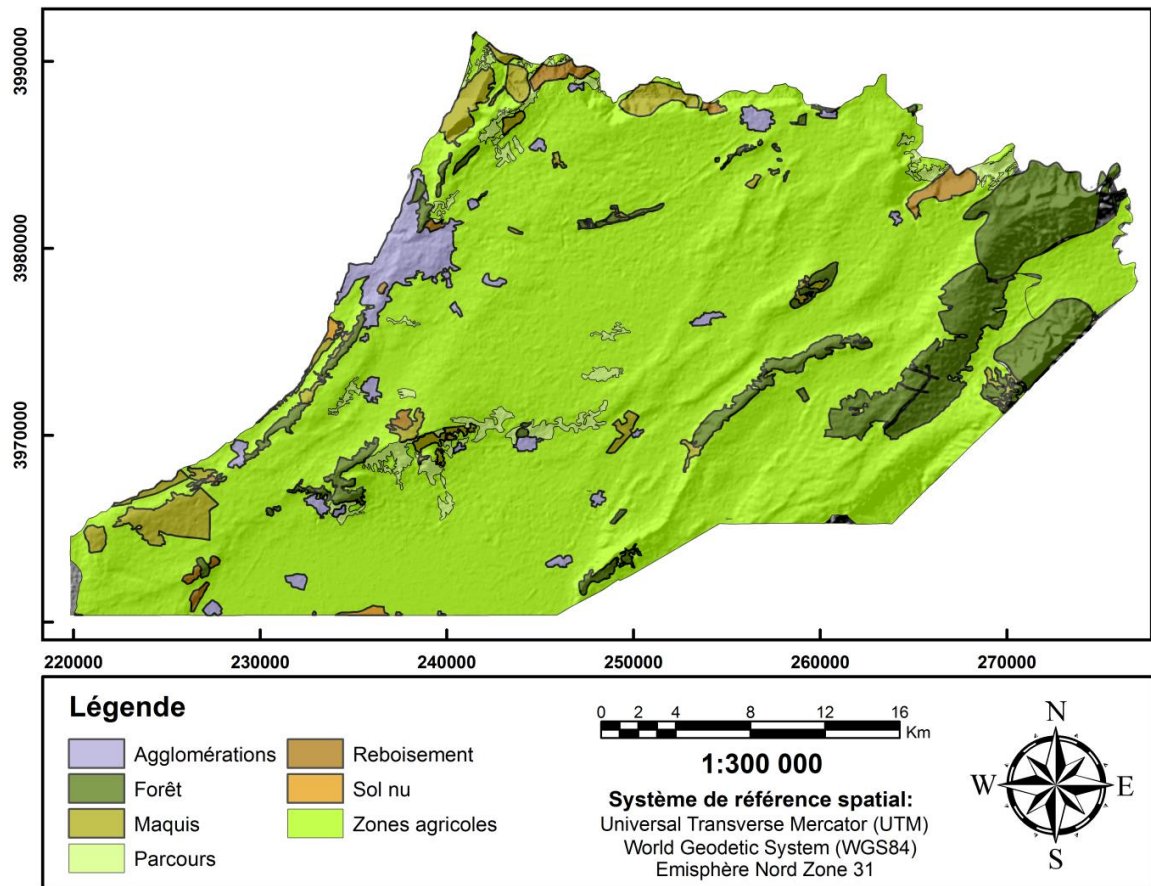


Figure A. 6. Carte thématique du facteur « CV & OS »

A partir de la carte thématique CV & OS, quatre (04) classes ont été définies, en fonction de la densité du couvert végétal. Cette classification est résumée dans le tableau suivant:

Type de Couvert Végétal & Occupation des sols	Surface (Km ²)	% Surface occupée / à la surface totale	Classe selon l'effet sur l'infiltration
Agglomérations	28,79	2,79%	Très faible
Sol nu et parcours	1,5	0,15%	Faible
Reboisement, forêt et maquis	142,08	13,79%	Moyenne à Faible
Zones agricoles	858,31	83,28%	Moyenne

Tableau A. 9. Récapitulation des différentes classes du CV & OS.

A.5.4 Evaluation des cotes des facteurs régissant la recharge

Afin d'évaluer les cotes (notations) des différents paramètres de manière homogène, une échelle de cotes, basée sur les plages de variation des paramètres, a été développée (Haouchine et al., 2010), voir tableau A.10.

Classe	Très forte	Forte	Forte à moyenne	Moyenne	Moyenne à faible	Faible	Très faible
Cote	10	8	6.5	5	3.5	2	1

Tableau A. 10. Echelle des cotes attribuées aux classes des facteurs

Une cote a été attribuée à toutes les classes, relatives à chacun des facteurs considérés dans cette étude, selon le tableau A.10. Les résultats de cette cotation sont illustrés dans le tableau A.11.

Facteur	Classes	Cote de l'effet
Couvert végétal et Occupation du sols	Très faible	1
	Faible	2
	Moyenne à faible	3.5
	Moyenne	5
Lithologie	Forte	8
	Forte à Moyenne	6.5
	Moyenne	5
	Faible	2
Sol	Forte à moyenne	6.5
	Moyenne	5
	Faible	2
	Très faible	1
Pente	Forte	8
	Moyenne	5
	Faible	2
Réseau hydrographique	Forte à moyenne	6.5

Tableau A. 11. Valeurs des cotes attribuées aux facteurs régissant la recharge

A.5.5 Pondération des facteurs régissant la recharge

La détermination des poids, des paramètres régissant la recharge, repose sur l'analyse des effets relationnels inter-paramètres, comme le montre la figure A.7.

Un point (1 point) est donné pour un effet majeur et un demi-point (0,5 point) pour un effet mineur. Le poids de chaque facteur correspond alors à la somme des effets qu'il entraîne sur les autres (Shaban et al, 2006).

Par conséquent, le poids de chaque facteur est exprimé comme suit :

- Réseau hydrographique : 4 effets majeurs = $(4 \times 1) = \mathbf{4pts}$.
- Couvert végétal : 1 effet majeur + 2 effets mineurs = $(1 \times 1) + (2 \times 0.5) = \mathbf{2pts}$.
- Pente : 3 effets majeurs = $(3 \times 1) = \mathbf{3pts}$.
- Lithologie : 4 effets majeurs = $(4 \times 1) = \mathbf{4pts}$.
- Sol : 2 effets majeurs + 2 effets mineurs = $(2 \times 1) + (2 \times 0.5) = \mathbf{3pts}$.

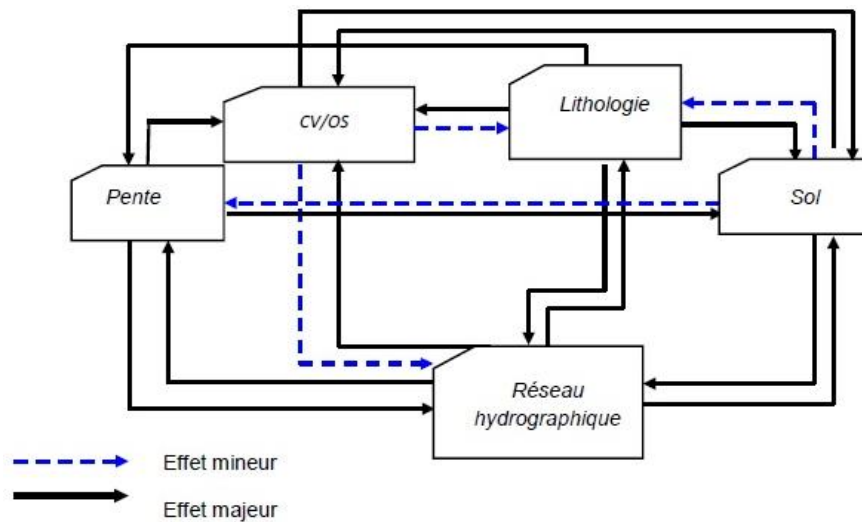


Figure A. 7. Effets entre les facteurs régissant la recharge

A.5.6 Indices d'infiltration et taux de contribution des facteurs dans la recharge

Pour évaluer la contribution de chaque facteur dans la recharge, son poids et sa cote ont été intégrés tels que mentionné dans le tableau A.12.

Facteur	Classe	Cote	Poids	Poids x cotes	Indice d'infiltration	Taux de contribution
Couvert végétal et Occupation du sols	Très faible	1	2	2	23	10,29%
	Faible	2		4		
	Moyenne à faible	3,5		7		
	Moyenne	5		10		
Lithologie	Forte	8	4	32	86	38,48%
	Forte à Moyenne	6,5		26		
	Moyenne	5		20		
	Faible	2		8		
Sol	Forte à moyenne	6,5	3	19,5	43,5	19,46%
	Moyenne	5		15		
	Faible	2		6		
	Très faible	1		3		
Pente	Forte	8	3	24	45	20,13%
	Moyenne	5		15		
	Faible	2		6		
Réseau hydrographique	Forte à moyenne	6,5	4	26	26	11,63%
					$\Sigma = 223,5$	

Tableau A. 12. Indices d'infiltration et taux de contribution des facteurs sur la recharge.

A.5.7 Carte synthèse de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem

L'établissement de la carte de la recharge du plateau de Mostaganem a été rendu possible grâce à l'agrégation de l'ensemble des cartes paramétriques élaborées et stockées sous forme de couches dessin (layer) dans le logiciel SIG utilisé.

A.5.7.1 Classes d'infiltration

L'agrégation pondérée des couches de dessin des cinq (05) facteurs régissant la recharge révèle quatre (04) zones majeures d'infiltration. Ainsi, quatre (04) niveaux descriptifs ont été mis en

évidence. La projection de ces niveaux sur l'échelle proposée par la FAO (1967) cité dans (Haouchine et al., 2010), montre des classes d'infiltration qui vont de très faible à forte infiltration, regroupées dans le tableau A.13.

Classe de recharge	Très Faible	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	Forte	Très forte
Taux déterminé	0-5%	5-10%	10-20%	20-25%	-----	-----
Taux moyen	2,5%	7,5%	15%	22,5%	-----	-----
Taux FAO (1967)	< 5%	5-10%	10-20%	20-30%	30-35%	45-50%
Surface da la classe (km²)	49	327	268	381	-----	-----
%Surface classe/surface totale	5	32	26	37	-----	-----

Tableau A. 13. Classes d'infiltration du plateau de Mostaganem

Ces classes révèlent un taux de recharge moyen dans la zone d'étude. La question à laquelle on devrait répondre à ce stade de l'étude est : comment peut-on calculer la quantité globale et zonale de la recharge ?

Pour y répondre à cette question, on doit procéder au calcul des quantités suivantes: le volume précipité globale et zonale, le volume infiltré globale et zonale ainsi que la lame globale et zonale infiltrée dans chaque zone déterminée.

A.5.7.2 Volume précipité

Le calcul du volume précipité dans un bassin hydrographique se calcul selon la relation suivante:

$$\text{Volume précipité} = \text{précipitation moyenne} * \text{surface totale} \quad (\text{A.2})$$

Selon la pluviométrie de la région de Mostaganem, présentée au tableau A.14, la précipitation moyenne ainsi que le volume précipité moyen de ce secteur ont été calculés comme suit:

- Précipitation Annuelle moyenne = 312,11 mm/an (Période:1969-2017).
- Volume précipité = **3,20 x 10⁸m³/an** (sachant que la surface totale de la zone d'étude est égale à **10,25 x 10⁸m²**).

Stations	Periode	Pluviométrie Annuelle Moyenne (mm/an)
Relizane	1988-2005	255.18
Bel Hacel	1989-2008	275.96
Mostaganem	1970-2017	336,87
O.El Kheir	1969 - 2004	283.11
Blad Touahria	1970 - 2017	308,04
Fornaka	1970 - 2017	259,77
Marais Sirat	1970 - 2004	279.9
Fmeassorain	1969 - 2004	321.4
Kheir Eddine	1970 - 2017	343,26
Dunes Cultivées	1970 - 2017	312,59

Tableau A. 14. Stations pluviométriques du secteur de Mostaganem

A.5.7.3 Volume infiltré

Pour calculer la quantité d'eau réellement infiltrée dans la zone d'étude, un calcul simplifié est proposé par la FAO (1967), cité dans (Haouchine et al., 2010) :

$$\text{Volume infiltré } (V_{\text{inf}}) = \text{volume précipité} * \Sigma (\text{taux de recharge} * \% \text{ de la surface}) \quad (\text{A.3})$$

La surface totale de la zone d'étude est d'environ **1025Km²**. La surface de chaque zone d'infiltration dégagée par le logiciel SIG, ainsi que le pourcentage de chaque classe par rapport à la surface totale de la zone d'étude, sont présentés au tableau A.15.

Le volume infiltré total de la zone d'étude est donc calculé selon la formule (A.3) comme suite:

$$\begin{aligned} V_{\text{inf}} &= 3,20. 10^8 * (0,025 * 0,0478 + 0,075 * 0,3190 + 0,15 * 0,2615 + 0,225 * 0,3717) \\ &= 46,99. 10^6 \text{ m}^3/\text{an} (\approx 47 \text{ million m}^3/\text{an}) \end{aligned}$$

Ceci veut dire que **14,68%** des précipitations s'infiltrent dans la zone d'étude. La lame infiltrée serait alors **L_{inf} = 45.84mm/an**. Cette infiltration se répartit sur le plateau comme suit :

Classe d'infiltration	Moyenne à forte	Moyenne	Faible	Très faible
Surface(km ²)	381	268	327	49
% surface classe/surface totale	37	26	32	5
Volume précipité (m ³ /an)	1,19.10 ⁸	0,84.10 ⁸	1,02.10 ⁸	0,15.10 ⁸
Volume infiltré (m ³ /an)	26,76.10 ⁶	12,54.10 ⁶	7,66.10 ⁶	0,04.10 ⁶
% volume infiltré	8,36	3,92	2,39	0,01

Tableau A. 15. Volume précipité, volume infiltré et lame infiltrée dans la zone d'étude

A.5.7.4 Carte synthèse du plateau de Mostaganem

Quatre (04) zone de recharge, relatives aux classes d'infiltration, se sont dégagées pour la zone d'étude (voir la figure A.8), il s'agit de:

- Zone 1 qui correspond à la classe d'infiltration "très faible". En effet, l'infiltration y est très faible à cause, d'une part, de l'aspect montagneux et les fortes pentes qui caractérisent cette zone. D'autre part, parce que ces terrains sont quasi imperméables (constitués essentiellement de marnes bleues, argiles et grès limoneux). Cette zone est localisée, essentiellement, à proximité de oued Chellif, au nord des localités: Ain Boudinar, Ain Tedels et Sour et à l'est du plateau au Djbel Mekhalia. Le pourcentage du volume infiltré dans cette zone est très petit, il est égale à 0,01%.
- Zone 2 où la recharge est faible relativement à la première zone, à cause de la diminution de la pente et la couverture végétales (Forêt et zone agricoles) favorable à l'infiltration. Cette zone occupe 32% de la surface totale du plateau. Le pourcentage du volume infiltré dans cette zone est très petit, il est égale à 2,39%. Il concerne essentiellement les agglomérations, telles que: Mostaganem ville, Chemmouma, Debdeba,..., la forêt de Dom El Akboub, ainsi qu'au sud du plateau au sud de Mesera.

- Zone 3 et 4 où la recharge varie de moyenne à forte. Ceci est dû à la nature de la lithologie et le sol de cette zone, qui est essentiellement constituées de sables et alluvions grésocalcaires. Aussi, la pente faible et la couverture végétale présentes dans cette zone sont très favorables à l'infiltration. Cette zone se centralise principalement à l'ouest du plateau de Mostaganem, à proximité des localités Kheir Eddine, Bel Hadri, Hassi Mameche,..., ainsi qu'à l'est du plateau à proximité de Douar Bouziane. Le pourcentage du volume infiltré dans cette zone est égal à 12,28%.

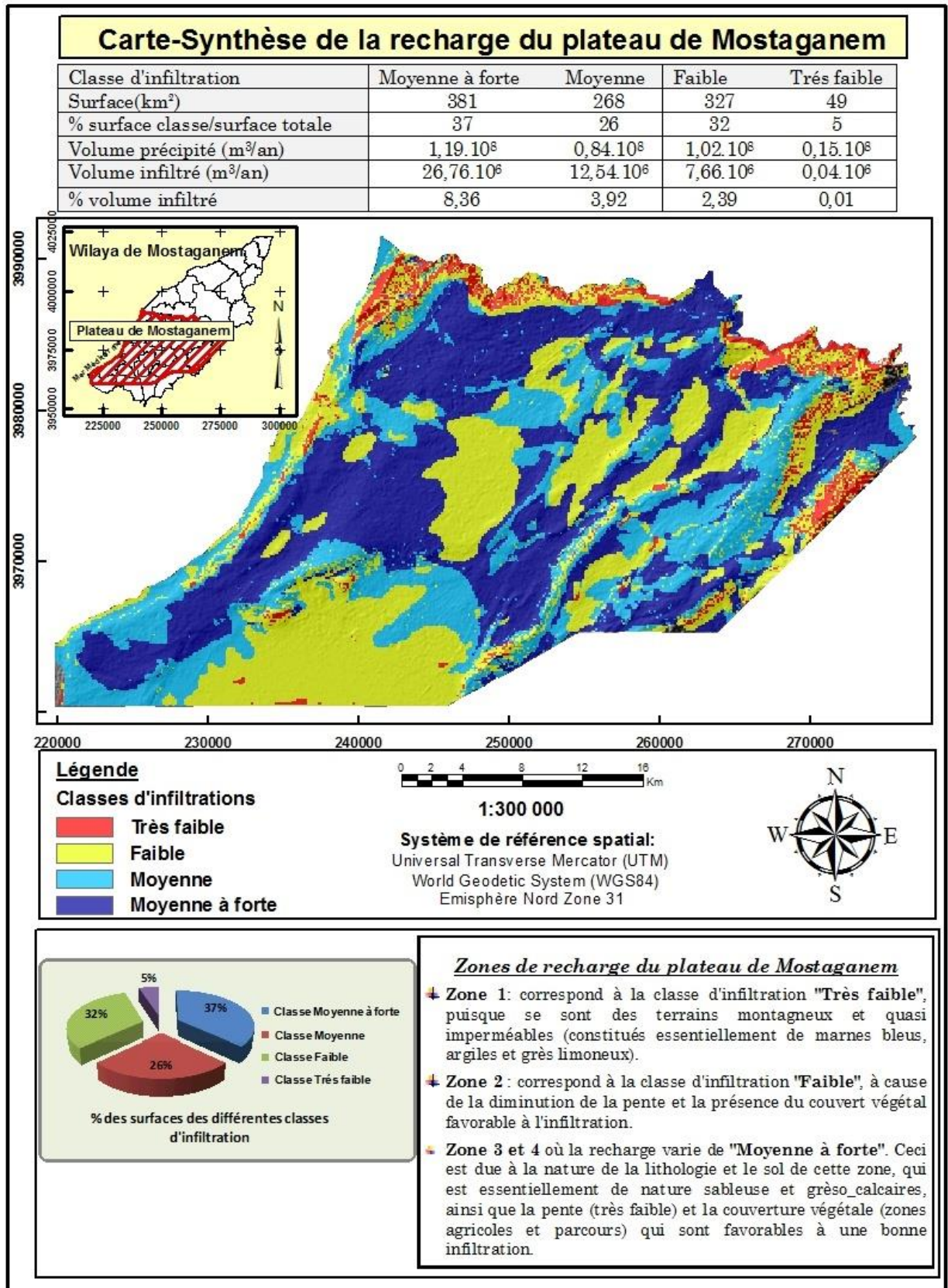


Figure A. 8. Carte synthèse de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem

A.6 Validation des résultats

Les résultats de cette étude ont été comparés avec les résultats d'autres méthodes appliquées à la même zone d'étude, en l'occurrence la méthode du bilan hydrique effectuée par P. Bonnet, (1967), qui affirme que l'alimentation de la nappe du plateau de Mostaganem est proche de 30 à 44 millions de m³/an et l'écoulement dans la nappe captive du Calabrien de la plaine de Bordjias est d'environ 2,5 millions de m³/an (ANRH, 2006); ce qui est cohérent avec la valeur de 45,84 million de m³/an estimée par la méthode présentée dans cette annexe.

A.7 Conclusion

L'évaluation de la recharge réelle des nappes d'eaux souterraines est l'un des paramètres les plus importants et le plus difficile à estimer. Une bonne évaluation, de ce paramètre, entraîne automatiquement une bonne gestion et une exploitation rationnelle des ressources naturelles en eaux souterraines.

En utilisant l'outil de l'analyse spatiale, disponible dans le logiciel ArcGis, l'agrégation et la compilation des données géographiques spatialisées (lithologie, pente, type de sol, réseau hydrographique) ont été possibles.

La carte synthèse, de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem réalisée dans cette étude, a permis de dégager quatre zones de recharge, qui divise la zone d'étude en quatre unités différentes. La première zone où la recharge est faible puisque ce sont des régions montagneuses présentant une forte pente et des terrains presque imperméables. La deuxième zone où la recharge est peu importante à cause de la diminution de la pente et la perméabilité des formations géologiques de cette zone. La troisième et quatrième zone où la recharge est forte et parfois très importantes. Ainsi une recharge globale de 89mm/an caractérise la nappe du plateau de Mostaganem.

Les résultats de cette étude montrent que le taux d'infiltration des eaux de précipitation vers la nappe du plateau de Mostaganem est modéré, il est de l'ordre de 14,68%, avec un potentiel de recharge équivalent à 45,84 million de Mètre cube par an. Ce résultat est parfaitement logique par rapport aux propriétés hydrogéologiques et climatiques du plateau de Mostaganem.

Toutefois, cette approche reste une proposition d'analyse spatiale qui devrait être confirmée par des mesures de terrain avant de pouvoir être utilisée dans le cadre de prise de décision. Une validation plus rigoureuse impliquerait la définition de nouveaux critères ou à en modifier les pondérations affectées.

Annexe B

Etude de la vulnérabilité de la nappe du plateau de
Mostaganem à la pollution par la méthode DRASTIC

B.1 Introduction

Les eaux souterraines de la nappe du plateau de Mostaganem subissent une pollution multiforme qui fragilise cette nappe. Essentiellement alimentées par les eaux de pluie, les ressources en eaux souterraines de cette nappe sont de plus en plus sollicitées pour couvrir les besoins en eau qui ne cesse de croître dans divers domaines (irrigation, industrie, etc.).

Cependant, ces ressources en eaux souterraines sont menacées par plusieurs facteurs liés à la mauvaise gestion, à la surexploitation et à l'intense utilisation d'engrais et de pesticides. La question principale qui se pose alors, est de savoir comment procéder à la gestion et la protection de nos ressources en eau ? Des mesures de prévention et de protection se posent pour cela. Cette protection peut être assurée en délimitant les zones dites vulnérables ou à haut risque.

Dans le but de préserver les ressources en eau souterraine de l'aquifère du plateau de Mostaganem et d'améliorer sa gestion, cette étude est menée pour cartographier sa vulnérabilité à la pollution par l'application de la méthode DRASTIC qui est considérée comme un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire.

B.2 Définition

La **vulnérabilité** est « l'absence de protection ou de défenses naturelles des eaux souterraines face à la menace de pollution, selon les conditions hydrogéologiques locales » (définition retenue par le Comité National des Sciences Hydrologiques).

Le concept de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique associé à la nappe phréatique offre un degré plus ou moins élevé de protection contre la pollution selon les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, deux types de vulnérabilité sont distingués: intrinsèque et spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

- **La vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour désigner les caractéristiques du milieu naturel qui conduisent à la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.
- **La vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour désigner la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un ensemble de polluants. Elle considère les propriétés des polluants et leurs relations avec les différents composants de la vulnérabilité intrinsèque.

B.3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère

Il existe de nombreuses méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères, allant des méthodes les plus complexes prenant en compte le processus physique, chimique et biologique dans la zone saturée, aux méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Le tableau suivant résume la plupart des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères (Allier et al, 2008).

DRASTIC	7 critères : Depth to Groundwater, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, Conductivity	Cette méthode est développée par l'EPA (Environmental Protection Agency) en 1985 et Aller <i>et al.</i> en 1987. Elle est utilisée pour la cartographie à petite échelle.
SINTACS	7 critères (cf. DRASTIC)	Dérivée de la méthode DRASTIC en 1990, utilisée pour une cartographie à moyenne et grande échelle.
AVI (Aquifer vulnerability Index)	2 critères : L'épaisseur et la Conductivité hydrauliques de chaque couche sédimentaire.	Développée par The National Hydrology Research Institute. Echelle régionale.
EPIK	4 critères : Epikarst, Couverture Protectrice, conditions d'Infiltration et développement du réseau Karstique.	Développée par Doerfliger en 1996 puis Doerfliger et Zwahlen, en 1997. Elle est destinée aux aquifères karstiques.
RISKE	5 critères : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst	Dérivée d'EPIK, pour les aquifères karstiques.
DISCO	3 critères: Discontinuités, Couverture protectrice, et Ruissellement.	Développée pour la définition des zones de protection.
GOD	3 critères: Groundwater occurrence ; Overall aquifer class et Depth to groundwater table	Elle est développée par Foster en 1987. Cette méthode ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée.
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Approche européenne LEA - Z. Alamy et C. Langevin (1989) - J. Ricour (1988) - S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991) - M.F. Suais (en 1990) - Méthode COP, au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Malaga - Méthode PI qui est développée par le BGR 	

Tableau B. 1. Tour d'horizon des méthodes de vulnérabilité. (Allier et al, 2008)

Ces méthodes (à l'exception des méthodes GOD et AVI) utilisent des critères liés à la géomorphologie du territoire étudié :

- Soit la pente qui est considérée directement par sa valeur absolue (DRASTICS, SINTACS ou Z. Alamy et C. Langevin en 1989).

- Soit la pente qui est considérée indirectement en prenant en compte la densité de drainage du réseau hydrologique de surface (DISCO, MF. Suais 1990).

Toutes les méthodes citées ci-dessus (DRASTICS, SINTAC, AVI, etc.) impliquent l'intégration de nombreuses données dont la collecte, au niveau régional, nécessite un engagement de temps et d'argent difficile à mobiliser (Allier et al, 2008).

Dans le cadre de la présente étude, notre choix a porté sur l'application d'une des méthodes de la catégorie de cartographie indicielle avec pondération des critères; à savoir: la méthode DRASTIC standard (Aller et al. 1987). Les méthodes de cette catégorie sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain en raison de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère par rapport à la vulnérabilité générale de la nappe. Ils sont également les plus reconnues et sont actuellement utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Gogu et Dassargues 2000; Zaporozec et Vrba 1994; Saibi et Ehara 2008).

B.4 Description de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été créée aux États-Unis en 1980 par la National Water Wells Association (NWWA) et l'Environmental Protection Agency (EPA) pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à l'échelle régionale (Suais et Durbar, 1993; Vrba et Zaporozec, 1995). Cette approche permet de créer des cartes de vulnérabilité qui constituent une synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'un territoire.

L'acronyme DRASTIC correspond aux premières lettres de sept paramètres hydrogéologiques: la profondeur de la nappe phréatique (D), la recharge nette (R), la lithologie de l'aquifère (A), la texture du sol (S), la topographie - pente du terrain (T), l'impact de la zone non saturée (I) et enfin la conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée (C) (Vrba J et al. 1994) voir figure B.1.

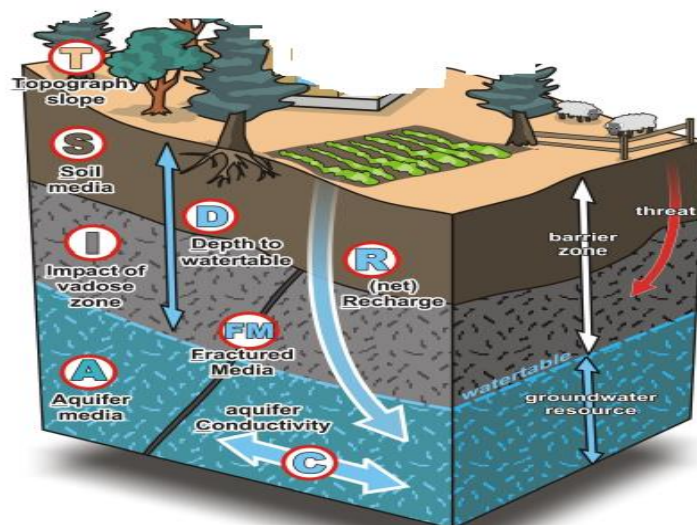


Figure B. 1. Paramètres DRASTIC

À chacun de ces paramètres correspond un poids (valeur prédéterminée) compris entre 1 et 5, reflétant l'importance de ce paramètre dans le processus de transport et l'atténuation des polluants. Un paramètre important est affecté d'un poids égal à 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'influence sur le devenir d'un polluant se voit assigné un poids de 1.

Le tableau suivant résume les propriétés de chacun des paramètres utilisés dans la méthode DRASTIC, ainsi que les poids qui leur sont affectés (Aller et al., 1987).

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.	5
R	Recharge nette	Véhicule principal du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de l'Aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	3
S	Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie (Pente)	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible.	1
I	Zone non saturée	La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable. (graviers, sables grossiers,...)	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

Tableau B. 2. Paramètres du modèle DRASTIC

B.4.1 Notation des paramètres DRASTIC

Pour chaque paramètre DRASTIC, une note est attribuée sur une échelle allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note faible signifie que la nappe concernée est moins sensible à la pollution, et inversement.

L'échelle est entière (discrète), donc naturellement les valeurs obtenues pour chaque paramètre sont regroupées dans des classes numérotées de manière unique.

D'après Lallemand et Barrès 1994, les notations accordées aux paramètres DRASTIC sont illustrées sur le tableau suivant :

Paramètre DRASTIC	Notation	Paramètre DRASTIC	Notation
D : distance à la nappe		R : Recharge (cm/an)	
Épaisseur de la ZNS (m)			
0 à 2	10	0 à 5	1
2 à 4	9	5 à 10	3
4 à 6	8	10 à 15	6
6 à 8	7	15 à 25	8
8 à 11	6	>à 25	9
11 à 14	5		
14 à 18	4		
18 à 25	3		
25 à 33	2		
> à 33	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Type de sol	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats	7
Grés massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altérée, grés	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégé et non fissuré	1
T : Pente (en %)		I : Impact de la zone vadoze	
0 à 2	10	Calcaire karstique	10
2 à 6	9	Basalte	9
6 à 8	8	Sable et gravier	8
8 à 10	7	Sable et gravier avec silt et argile	6
10 à 12	5	Calcaire lité, grés, shale	6
12 à 18	3	Grés	6
>à 18	1	Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/Argile	1
C : Conductivité hydraulique (m/s)			
	> 9,4 10 ⁻⁴		10
	4,7.10 ⁻⁴ à 9,4 10 ⁻⁴		8
	32,9.10 ⁻⁵ à 4,7.10 ⁻⁴		6
	14,7.10 ⁻⁵ à 32,9.10 ⁻⁵		4
	4,7.10 ⁻⁵ à 14,7.10 ⁻⁵		2
	4,7.10 ⁻⁷ à 4,7.10 ⁻⁵		1

Tableau B. 3. Notations accordées aux paramètres DRASTIC (Lallemand-Barrès., 1994).

B.4.2 Calcul de l'indice DRASTIC de Pollution "DPI"

Le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC notée "DPI", pour chaque unité hydrogéologique, est obtenu en sommant le produit de chaque note par son poids selon l'équation suivante (Osborne et al. 1998) :

$$DPI = rD*ND + rR*NR + rA*NA + rS*NS + rT*NT \quad (B.1)$$

Avec : rD, rR, rA, rS, rT, rI, rC : sont les poids des paramètres DRASTIC

ND, NR, NA, NS, NT, NI, NC : sont les notes des paramètres DRASTIC

L'indice ainsi calculé représente une mesure du niveau de risque de pollution de l'unité hydrogéologique à laquelle il appartient. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice. Il peut prendre une valeur maximale de 226 (100 %) et une valeur minimale de 23 (0 %).

Une classification a été établie par Engel et al 1996 qui permet de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices (tableau B.4).

Classes de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité (DPI)
Faible	< à 101
Moyenne	101 à 140
Elevé	140 à 200
Très élevé	> à 200

Tableau B. 4. Classes de vulnérabilité en fonction de l'indice DPI

Le **DPI** n'a pas de dimension. La valeur obtenue, ou l'ordre de grandeur n'a pas de sens en lui-même. L'unité du **DPI** est considérée lorsque l'on compare deux sites ou un site relativement à plusieurs autres sites. Le site avec le plus grand DPI sera considéré le plus susceptible à une éventuelle contamination ou pollution (Vrba J et al., 1994).

B.5 Validation de la carte de vulnérabilité

Toute carte de vulnérabilité développée doit être testée et validée. En effet, plusieurs auteurs ; Isabel et al. (1990); Champagne et Chapuis, (1993); Mohamed, (2001); Jourda et al., (2006); Hamza et al., (2007) , Kouamé (2007), Gabriel Etienne et al (2009), Sbagoud S., (2013); ont vérifié la validation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines.

Dans le cas de cette étude, la validation de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC, a été effectuée par le contrôle du taux des nitrates dans les eaux souterraines en établissant une comparaison entre la répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines et la distribution des classes de vulnérabilité.

La carte qui représente la répartition des nitrates a été établie et présentée à la section C.4.9 de l'annexe C. Comme il a été mentionné, cette carte est réalisée sur la base de données hydrochimiques fournis par la DRE de la wilaya de Mostaganem (voir annexe E).

B.6 Application de la méthode DRASTIC au plateau de Mostaganem

B.6.1 Sources de données relatives aux paramètres DRASTIC

L'application de la méthode DRASTIC nécessite une importante collecte de données liées à l'hydrogéologie, la géologie, la morphologie, la pédologie et la topographie

du milieu naturel. Le Tableau B.5 présente la source des données de chaque paramètre de DRASTIC.

Symbole	Paramètre	Type et source de données
D	Epaisseur de la ZNS	- Courbe de niveau (MNT) (ANRH); - Campagnes piézométriques (ANRH, 2016).
R	Recharge	- Etude de la recharge (voir annexe A)
A	Lithologie de l'Aquifère	- Coupes lithologiques de forages (Baiche, 1993); - Carte hydrogéologique interprétative de la région de Mostaganem. Echelle: 1/200000, ANRH 2008; Annexe D)
S	Sol	Etude Agro pédologique de Mostaganem
T	Pente	- MNT Mostaganem
I	Zone non saturée (Vadose)	-Coupes lithologiques de forages (Baiche, 1993); -Carte géologique interprétative Mostaganem (Echelle:1/200000, ANRH 2008).
C	Perméabilité	- Carte hydrogéologique interprétative de la région de Mostaganem. Echelle: 1/200000, ANRH 2008)

Tableau B. 5. Sources de données relatives aux paramètres DRASTIC

Le traitement de toutes ces données s'est effectué à l'aide du logiciel ArcGis 10.1. Une base de données et une cartographie spatialisée de la zone d'étude ont été réalisées.

B.6.2 Elaboration des couches thématiques des paramètres DRASTIC

B.6.2.1 Epaisseur de la zone non saturée (D)

L'épaisseur de la Zone non saturée est considérée comme l'un des plus importants paramètres dans le modèle DRASTIC avec une pondération de cinq (05). Il joue un rôle primordial dans la qualification de la capacité de l'aquifère à être affecté par l'infiltration d'un polluant. Elle est déterminée par la différence d'altitude entre les courbes de niveau (MNT) et les courbes piézométriques.

Pour une nappe libre, l'épaisseur de la zone non saturée est égale à la profondeur du niveau piézométrique. Pour une nappe captive, c'est la profondeur du toit de l'aquifère qui est pris comme épaisseur de la zone non saturée. Comme le montre la figure B.2, les données relatives à cette épaisseur sont présentées sur l'ensemble du plateau de Mostaganem.

La définition des classes de l'épaisseur de la zone non saturée (D) a été effectuée selon la notation accordée par Lallemand et Barrés, 1994. Les classes ainsi retenues pour le paramètre « D » sont récapitulées dans le Tableau B.6.

Classes (m)	11	11– 14	14– 18	18– 25	25– 33	> 33
Note	6	5	4	3	2	1

Tableau B. 6. Classification et notation du paramètre profondeur (Epaisseur de la zone non saturée).

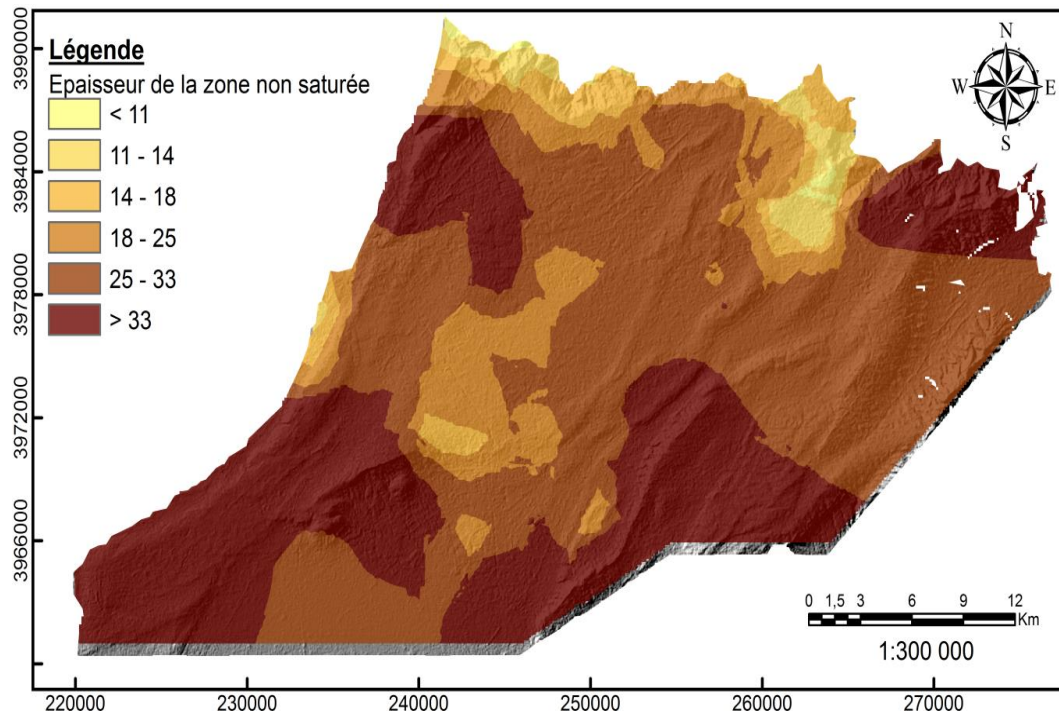


Figure B. 2. Epaisseur de la zone non saturée (D).

B.6.2.2 Recharge (R)

Pour appliquer la méthode DRASTIC, nous avons effectué une étude de la recharge directe de la nappe du plateau de Mostaganem. Cette étude est détaillée dans l'annexe A.

Le tableau B.7 résume les classes de recharge retenues pour ce paramètre sur l'ensemble de la zone d'étude. Deux classes de recharge ont été retenues:

- La classe de 0 à 50mm : cette classe correspond aux trois classes, très faible (0,78mm), faible (23,42mm) et moyenne (46,79mm), déterminées sur la zone d'étude.
- La classe de 50 à 100mm : cette classe correspond à la classe de recharge moyenne à forte (70,25mm).

Classes (mm)	0 – 50	50 – 100
Note	1	3

Tableau B. 7. Classification et notation du paramètre recharge

La figure B.3 représente la carte thématique relative au paramètre recharge.

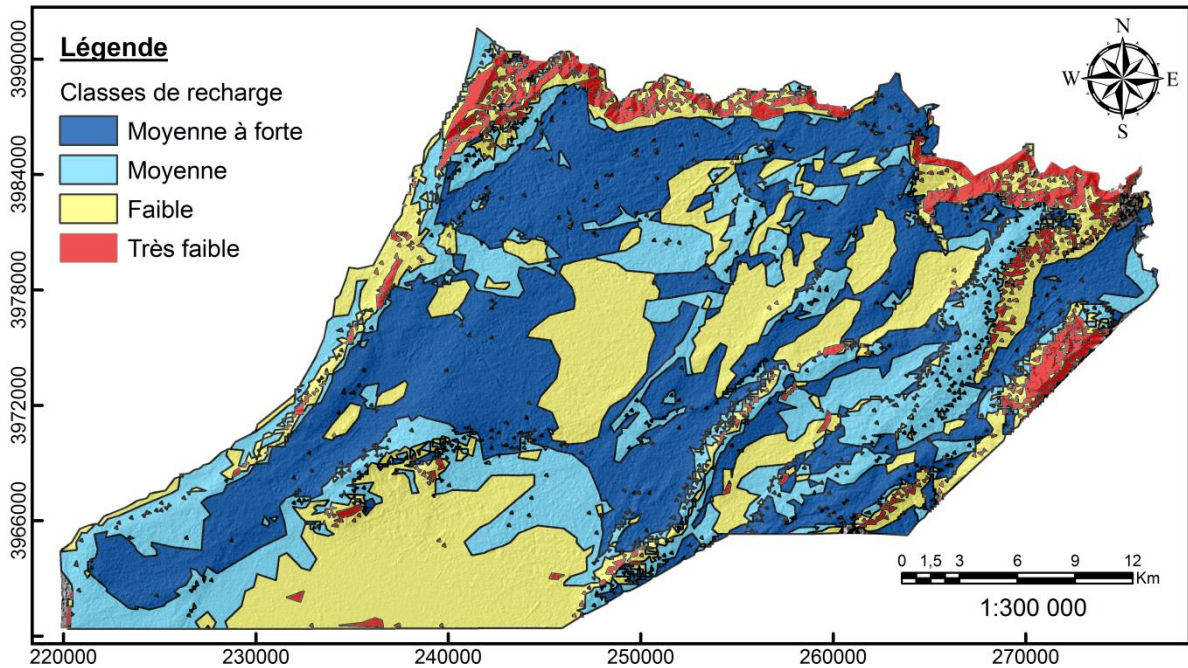


Figure B. 3. Classes de recharge dans le plateau de Mostaganem

B.6.2.3 Milieu Aquifère (A)

Le paramètre milieu aquifère décrit la lithologie de l'aquifère et intervient dans le captage des polluants, dont les nitrates échappés au pouvoir d'absorption du sol. L'identification de ce paramètre est basée sur les logs et les coupes lithologiques des forages réalisés dans la zone d'étude. L'analyse de ces données a montré que la formation aquifère de la nappe du plateau de Mostaganem est constituée essentiellement de sable, de grès, de grès calcaire et alluvions du quaternaire.

La notation des différentes classes qui représentent la lithologie de l'aquifère est présentée dans le tableau B.8.

Classes de lithologie de la zone Aquifère	Note
Grès calcaires gréseux, marne jaune sable	6
Agglomération	4
Calcaire marneux à silex et marnes	2
Alluvions actuelles et récentes SGA (Sable, Gravier, Argile)	8
Sables	8
Croûte calcaire dépôt quaternaire ancien	10
Calcaire à lithothamnium et grès à Clypéastres	6

Tableau B. 8. Classification et notation du paramètre lithologie de l'aquifère

La figure B.4 représente la carte thématique relative au paramètre lithologie de l'aquifère.

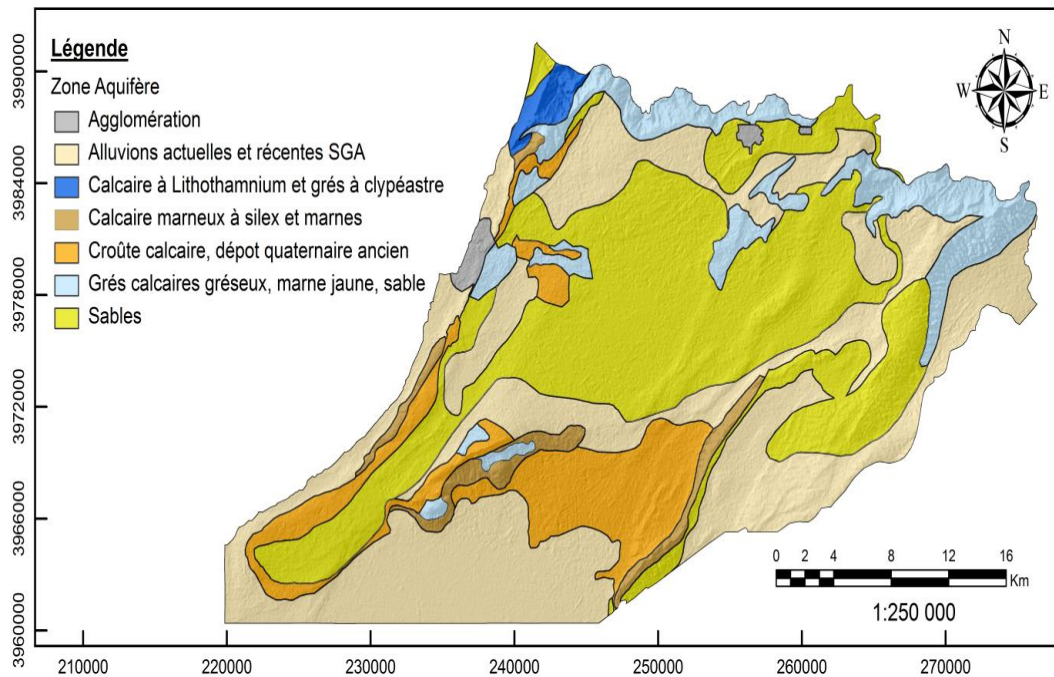


Figure B. 4. Lithologie de l'aquifère du plateau de Mostaganem

B.6.2.4 Sol (S)

Le sol représente la couche végétale du sol d'épaisseur variant de 1 à 1,5 m. La présence des particules de texture fine, telles que l'argile, réduit la perméabilité et freine la migration des polluants, ce qui augmente la protection des eaux souterraines.

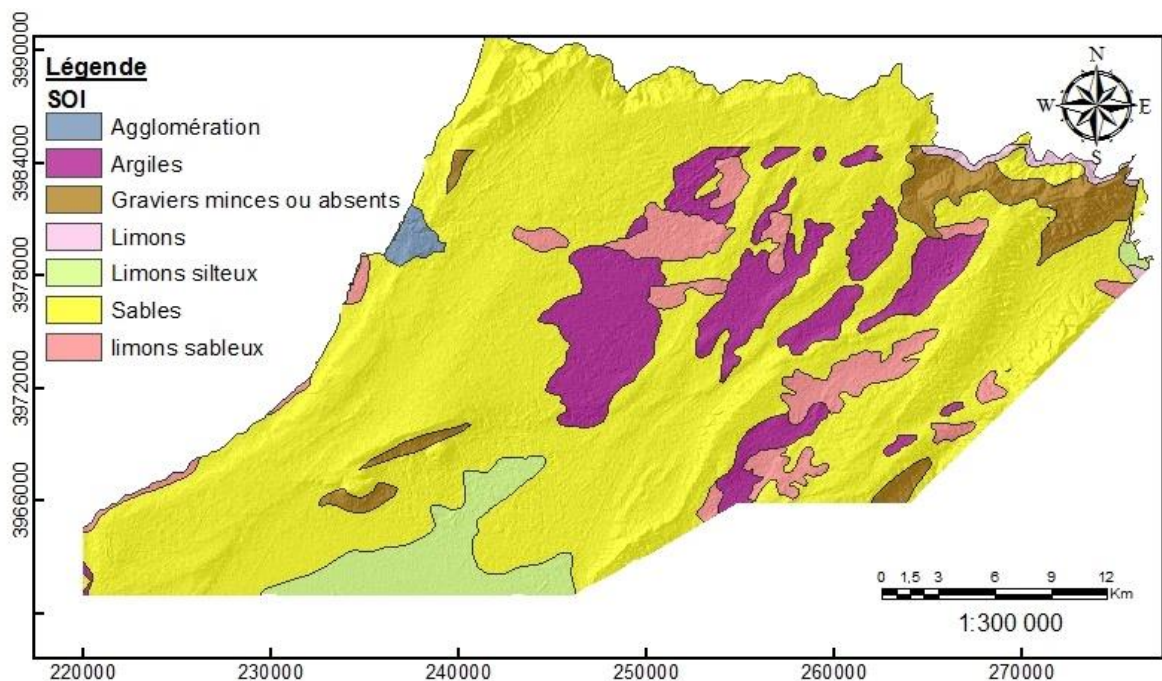


Figure B. 5. Carte de sol du plateau de Mostaganem.

Les informations recueillies à partir des études et cartes pédologiques ont permis de définir la nature du sol de la région d'étude (figure B.5). Les notes, relatives à ce paramètre, ont été déterminées selon les classes signalées dans le tableau B.9.

Classes	Mince ou absent	Graviers	Sables	Limons sableux	Limons	Limons silteux	Argiles
Note	10	10	9	6	4	3	1

Tableau B. 9. Classification et notation du paramètre sol.

B.6.2.5 Topographie (T)

Dans la méthode DRASTIC, la topographie est représentée par les valeurs de pente en pourcentage. La topographie conditionne en générale l'infiltration des eaux de pluie et de n'importe quel polluant.

Plus la pente du terrain est grande, plus le ruissellement de l'eau est important et la pollution des eaux souterraines est réduite. D'autre part, une zone à faible pente a tendance à retenir l'eau pendant une longue période, ce qui permet un plus grand potentiel de migration des polluants.

La définition des classes de pente (T) a été basée selon la notation accordée par Lallemand et Barrés, 1994. Les classes ainsi retenues pour le paramètre pente « T » sont récapitulées dans le tableau B.10.

Plage de la pente en %	0 à 2	2 à 6	6 à 8	8 à 10	10 à 12	12 à 18	>18
Note	10	9	8	7	5	3	1

Tableau B. 10. Classification et notation du paramètre topographie

La figure B.6 représente la carte thématique relative au paramètre pente.

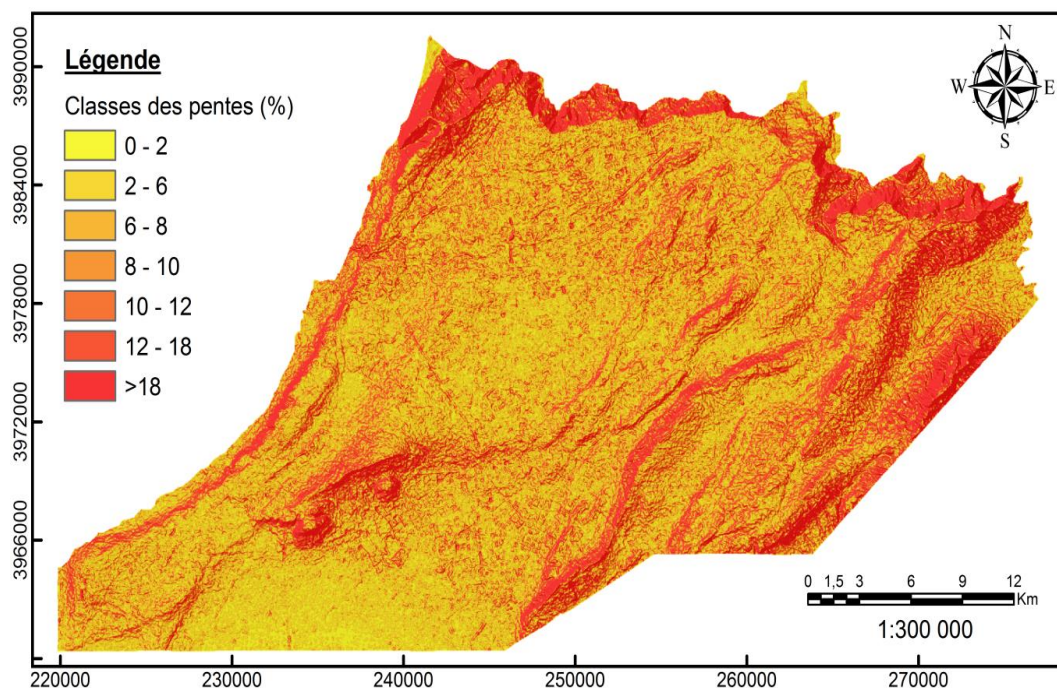


Figure B. 6. Carte des pentes (en %) du plateau de Mostaganem

B.6.2.6 Impact de la zone vadose (I)

La zone vadose représente la tranche non saturée du sol, siège de mécanisme de biodégradation, filtration, neutralisation, volatilisation, dispersion et atténuation du polluant. La nature de cette zone est un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité, car elle affecte le taux de propagation des contaminants vers l'aquifère (similaire à celui du milieu aquifère (A)). Son effet est déterminé par la lithologie du terrain qui la constitue.

Le processus de calcul et de cartographie de ce thème est obtenu par interpolation et corrélation des données de forages (logs) et par numérisation de la carte géologique (échelle 1/200.000). Les différentes classes ainsi obtenues sont notées de 1 à 9 selon le modèle DRASTIC au tableau B.11.

Classes de lithologie de la zone vadose	Note
Grés-calcaire	5
Grés-sable	6
Grés-marne	4
Grés-calcaire-sable	6
Grés-sable-argile	4
Grés	6
limon sableux	4
Grés-argile	3
Marne-argile	1
Sable	7

Tableau B. 11. Classification et notation du paramètre 'Zone Vadose'

La figure B.7 représente la carte thématique relative au paramètre « Impact de la zone non saturée : zone vadose ».

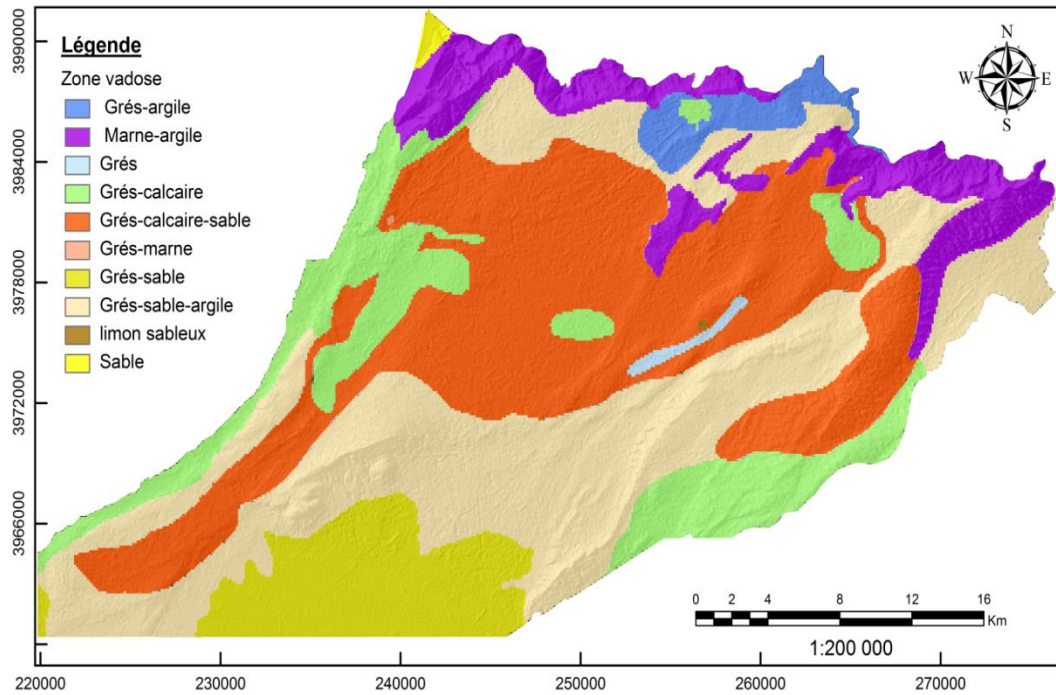


Figure B. 7. Lithologie de la zone vadose du plateau de Mostaganem.

B.6.2.7 Conductivité hydraulique de l'aquifère (C)

La conductivité hydraulique de la couche aquifère est contrôlée par la texture granulométrique et le degré de fracturation du milieu aquifère. Ce paramètre est en relation directe avec les caractéristiques de l'écoulement dans la nappe (débits, vitesse, gradient hydraulique).

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de vulnérabilité dans notre zone d'étude sont obtenues par numérisation de la carte hydrogéologique interprétative de la région de Mostaganem (Figure D.1, annexe D).

Le tableau B.12 résume les différentes classes de perméabilité de la zone d'étude. La répartition spatiale de ces classes est présentée dans la figure B.8.

Classes de perméabilité	Note
Bonne	7
Moyenne	4
Faible	2

Tableau B. 12. Classification et notation du paramètre perméabilité

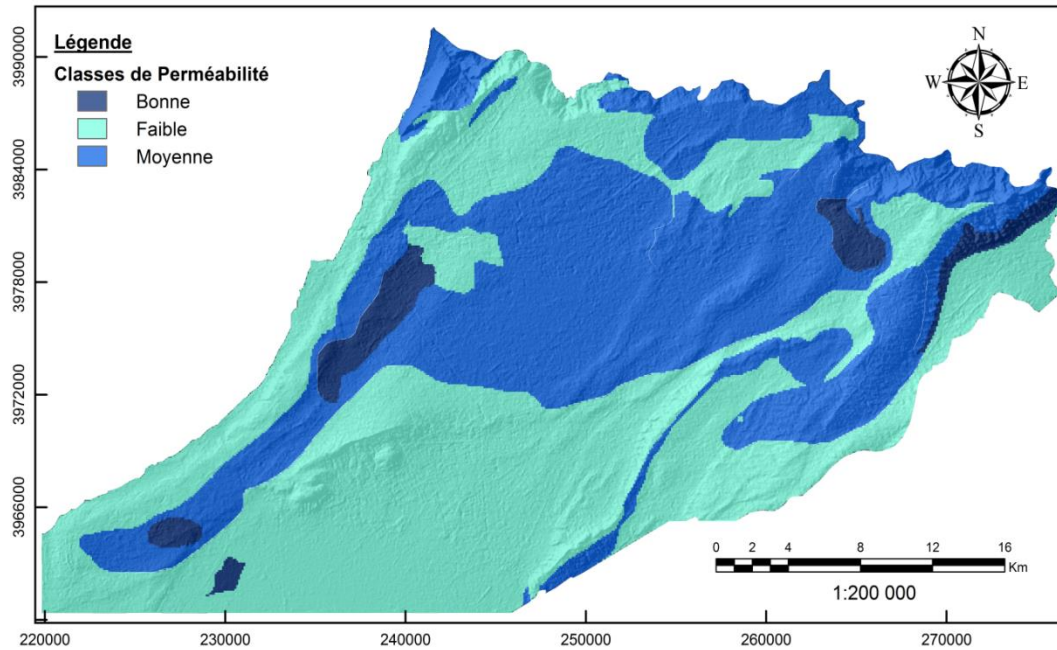


Figure B. 8. Carte de perméabilité du plateau de Mostaganem

B.6.3 Calcul de l'indice DRASTIC "DPI"

L'organigramme présenté à la figure B.9 récapitule les étapes de calcul et d'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution du plateau de Mostaganem.

1. Grace aux fonctionnalités offertes par les SIG, chaque paramètre DRASTIC est représenté par une couche d'information indépendante.
2. Une carte uni-critère représentant la vulnérabilité à la pollution a été faite pour chaque paramètre DRASTIC.
3. Le calcul des indices de vulnérabilité "DPI", selon la méthode DRASTIC, a été fait grâce à l'outil « Somme pondérée » du menu Spatial Analyst de ArcGIS. Cet outil permet d'additionner plusieurs rasters en utilisant une échelle de mesure commune et les pondèrent en fonction de leur importance.

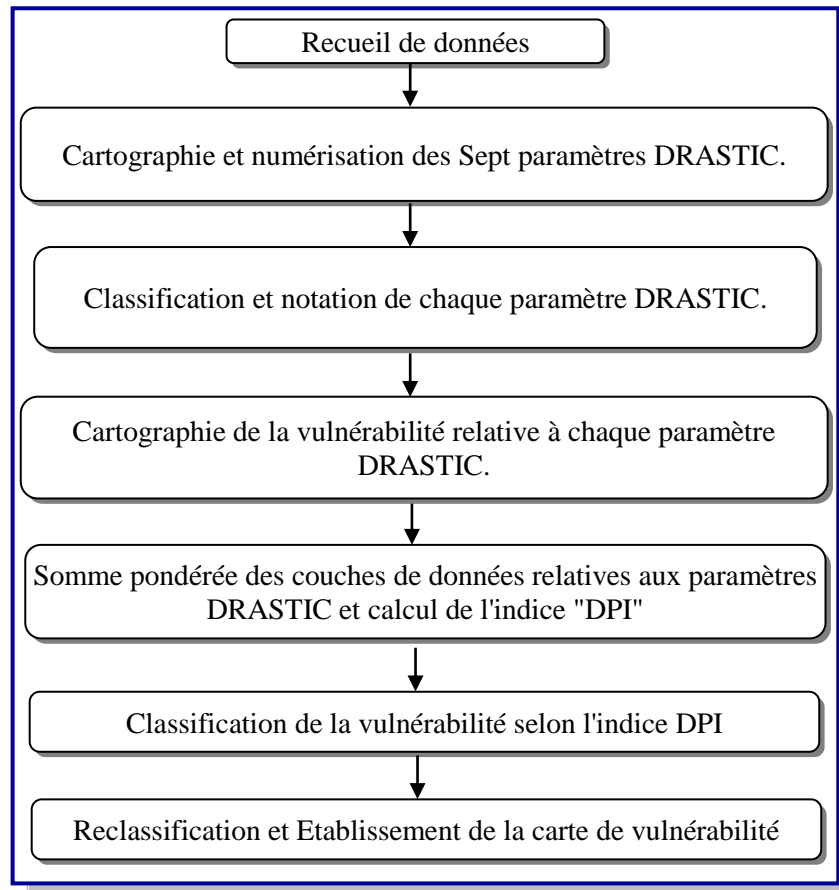


Figure B. 9. Organigramme de calcul et d'établissement de la carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC nous a permis de calculer les indices de vulnérabilité "DPI". Ces indices représentent une évaluation du niveau de risque de contamination qui augmente avec la valeur de celui-ci de 23 (0%) à 226 (100%).

Pour notre zone d'étude, les valeurs de l'indice DPI varient de 45 à 144. En se basant sur la classification d'Engel et al 1996, spécifiée plus haut, nous obtiendrons la classification suivante :

Indice DPI	Classification de la vulnérabilité
44 - 101	Faible
101 - 144	Moyenne

Tableau B. 13. Classification de la vulnérabilité du plateau de Mostaganem.

B.6.4 Carte de vulnérabilité du plateau de Mostaganem

On se basant sur les valeurs du DPI obtenus dans la section précédente (B.6.3), une reclassification de ces valeurs a été faite conformément au tableau B.13, ce qui a permis de réaliser la carte de vulnérabilité à la pollution du plateau de Mostaganem, présentée dans la figure B.10.

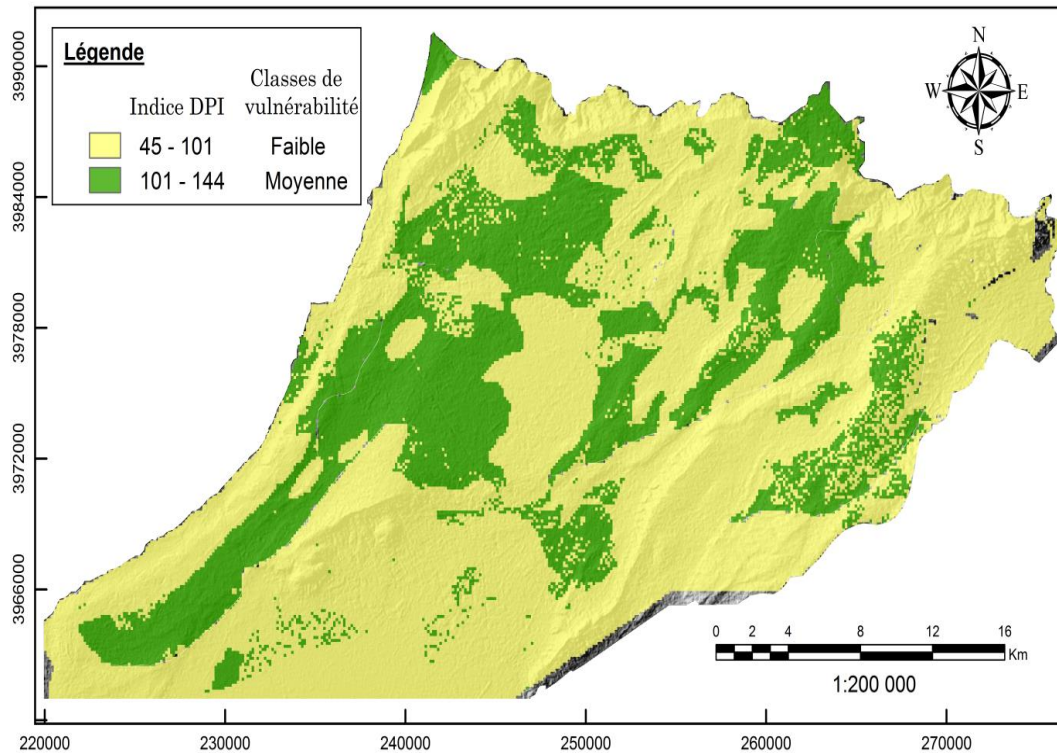


Figure B. 10. Carte de vulnérabilité du plateau de Mostaganem

Deux classes traduisant le degré de vulnérabilité à la pollution ont été mises en évidence sur la carte de vulnérabilité du plateau de Mostaganem. Il s'agit des classes suivantes:

1. Une classe de vulnérabilité 'Faible' qui occupe 673,66 km² soit 70% de la zone d'étude. Cette faible vulnérabilité peut s'expliquer par:
 - Une recharge faible à moyenne,
 - Une grande profondeur (distance à la nappe) de l'ordre de 33m et plus,
 - Un aquifère constitué essentiellement d'alluvions actuelles et récentes (sable, gravier à caractère argileux),
 - Une zone vadose, essentiellement, gréseu_calcaire,
 - Une faible perméabilité de cette zone.

Toutes ces conditions rendent l'immigration des polluants très difficiles.

2. La deuxième classe de vulnérabilité, qui occupe 289,38 km² soit 30% de la zone d'étude, est une vulnérabilité moyenne qui s'explique par :
 - Une recharge moyenne à forte,
 - Une faible profondeur de la nappe, allant de 14 à 25m, parfois atteignant les 33m à Blad Touaria, Mansourah au Sud-est du plateau et à Sayada au Nord-ouest du plateau. cette faible profondeur facilite l'accessibilité au polluants,
 - Une zone vadose constituée essentiellement de grés, calcaire et sable,
 - Un aquifère sableux,

- Une bonne perméabilité de cette zone,
- Et en ce qui concerne la topographie, la partie de la zone d'étude qui est caractérisée par des pentes faibles, favorise l'infiltration qui a son tour augmenterait la vulnérabilité de la nappe

Toutes ces caractéristiques favorisent l'immigration facile des polluants.

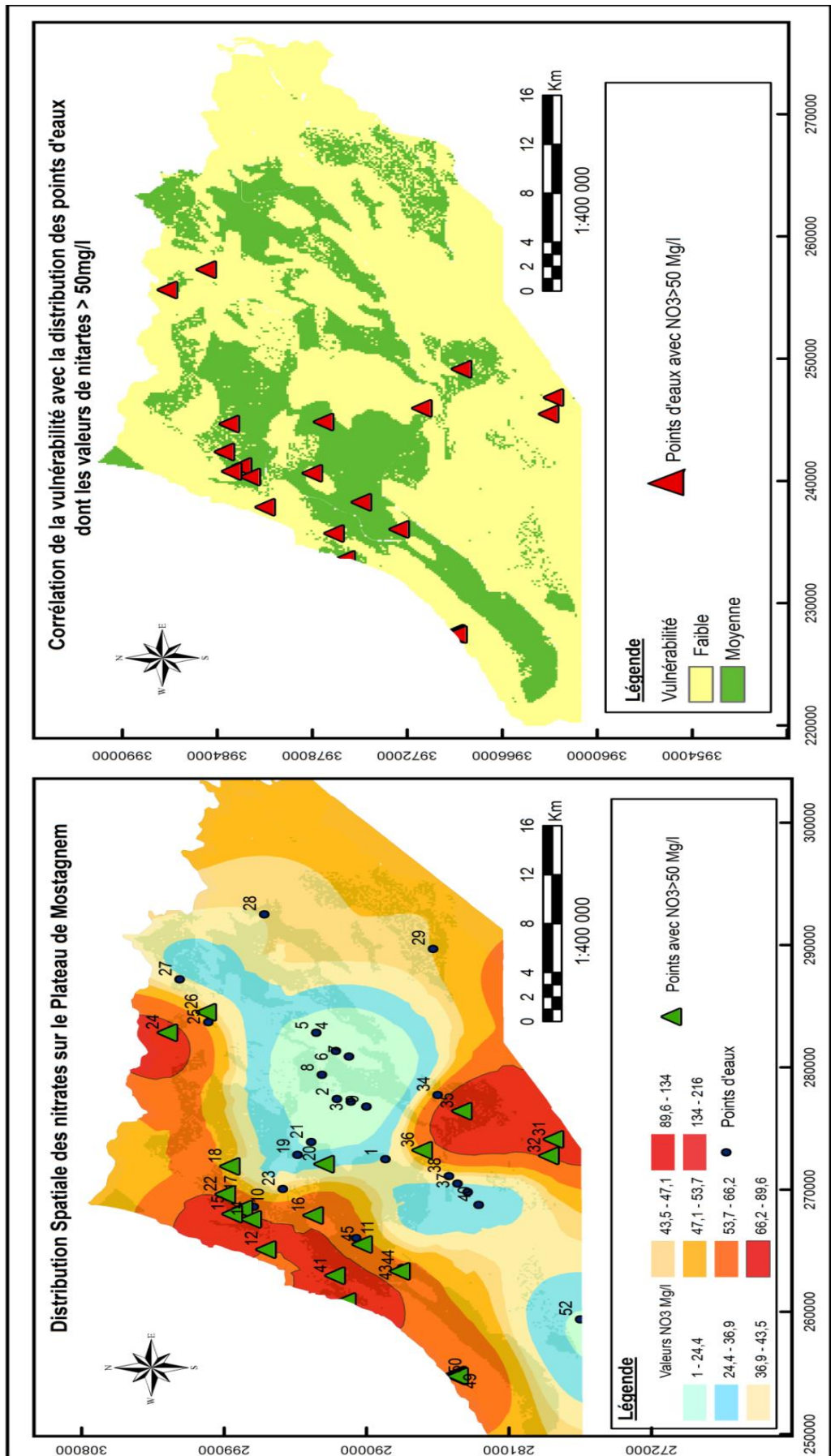
B.7 Comparaison du degré de vulnérabilité à la pollution avec la répartition spatiale des nitrates

Les concentrations de nitrates contenues dans les eaux souterraines du plateau de Mostaganem varient entre 1 et 216mg/l. La valeur de 216mg/l, qui dépasse de loin les normes admissibles de l'OMS (50 mg/l), est enregistrée au forage n°15 (F Douar Henni- Sayada-) au Nord-Ouest du plateau. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées aux Nord-Ouest et au Sud-Ouest du plateau (voir figure B.11).

En comparant la carte de répartition spatiale des nitrates avec la carte de vulnérabilité (figure B.11), on constate que les zones à forte concentration en nitrates sont corrélées avec les zones à haute vulnérabilité.

Toutefois, on constate l'existence d'autres zones à forte concentration en nitrates comme au sud de la zone d'étude, au niveau des points d'eaux n°31 et, 32 et qui n'apparaissent pas sur la carte de vulnérabilité. Aussi, la partie littorale du plateau de Mostaganem enregistre une forte concentration des nitrates qui apparaissent dans la classe de vulnérabilité faible. Cela peut être expliqué par le sens de l'écoulement des eaux de la nappe qui se dirige essentiellement vers le sud et le sud-ouest du plateau (Vers la Mer Méditerranéenne).

Figure B. 11. Comparaison et Corrélation de la distribution spatiale des nitrates et les classes de vulnérabilité dans le plateau de Mostaganem



B.8 Carte des zones à haut risque de pollution sur le plateau de Mostaganem

Les pratiques agricoles et l'élevage influencent fortement la qualité des eaux par l'emploi des engrais afin d'améliorer le rendement de la culture. De même, l'élevage intense (bovin, aviculture) contribue à la pollution organique par les composés azotés et phosphatés par l'usage des déchets animaux comme fertilisants. Le réseau d'assainissement absent dans certains endroits auquel s'ajoute certaines activités industrielles représentent une autre source de contamination de la nappe.

La figure B.12, réalisée par Saibi (Saibi, 2000), montre les principales sources de pollution sur le plateau de Mostaganem. Les sources de la pollution des eaux souterraines sont nombreuses.

Dans la région de Mostaganem, il y a trois principales sources:

- Les eaux usées domestiques qui font référence aux eaux usées qui sont rejetées par les ménages. Aussi dénommées eaux usées sanitaires, cette eau contient une grande variété d'impuretés dissoutes et en suspension.
- Les terrains agricoles: dans la zone de Mostaganem, il y a plus de 4400 hectares de l'arboriculture et 8 000 hectares de maraîchage qui utilisent des engrais et pesticides.
- les effluents industriels, où les eaux usées provenant de la fabrication ou des procédés chimiques dans les industries, contribuant aussi, à la pollution de l'eau.

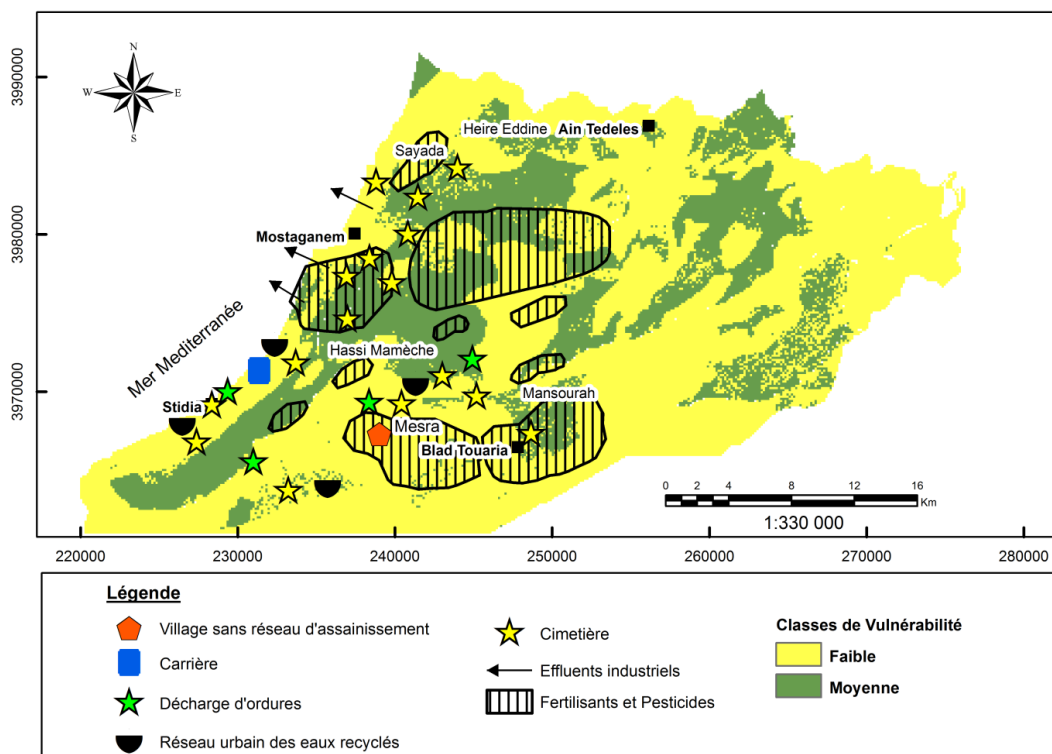


Figure B. 12. Combinaison de la carte des sources de pollution dans le plateau de Mostaganem et les classes de vulnérabilité à la pollution

En combinant cette carte et la carte de vulnérabilité, nous pouvons découvrir les zones à haut risque de pollution, à savoir: les régions Ouest du plateau de Mostaganem (Mostaganem, Keire Edinne, Sayada), les régions centre du plateau et les régions sud du plateau (Blad Touaria, Mansourah, Mesra, Hassi Mamèche, Stidia).

B.9 Conclusion

La cartographie de la vulnérabilité de la nappe du plateau de Mostaganem, réalisée dans le cadre de cette thèse en utilisant la méthode DRASTIC et les systèmes d'informations géographiques (SIG), révèle une tendance de vulnérabilité à la pollution faible (70%) à moyenne (30%), ce qui permet de conclure que cette nappe est menacée localement, par l'infiltration des polluants à partir de la surface du sol.

Même si la classe de moyenne vulnérabilité ne représente que 30% de la surface totale du plateau, le risque de pollution existe, vu la présence de plusieurs sources de pollution dans la région.

La comparaison de la carte de vulnérabilité aux mesures de nitrates, disponibles dans les eaux souterraines, montre que la carte est valide avec un taux de coïncidence assez élevé entre les concentrations en nitrates disponibles et les différentes classes de vulnérabilité.

Cette étude de vulnérabilité, nous a permis d'établir une carte à la fois de vulnérabilité et de sensibilité au risque de pollution dans le plateau de Mostaganem. Toutefois, il faut noter que malgré la facilité de mise en œuvre et de report cartographique de la méthode DRASTIC grâce au SIG, des difficultés apparaissent dans son élaboration à savoir :

- L'établissement et la cartographie des paramètres DRASTIC, notamment les cartes relatives aux paramètres lithologie de l'aquifère, lithologie de la zone vadose et la conductivité hydraulique.
- La fiabilité et la disponibilité des données.

Néanmoins, la carte de vulnérabilité établie par la méthode DRASTIC permet toujours de se faire une idée assez précise sur les zones vulnérables d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires ou pour éviter l'implantation de forage de captage d'eau dans les endroits les plus vulnérables.

Annexe C

Paramètres hydro-chimiques et Etude de la qualité des
eaux de la nappe du plateau de Mostaganem

C.1 Introduction

L'utilisation de l'eau souterraine dans le plateau de Mostaganem augmente en raison de l'expansion de la ville et de la croissance industrielle.

Plusieurs facteurs influencent la composition chimique de l'eau souterraine tels que, l'apport atmosphérique, l'interaction de l'eau avec les roches et les activités humaines. En effet, la pollution atmosphérique peut considérablement détériorer la qualité des ressources hydriques. Lorsque nous polluons l'atmosphère, nous polluons également les précipitations qui tombent sur nos eaux et nos sols. Aussi, l'eau infiltrée au sous-sol se charge en composants des sols et des roches mères, ce qui lui donne une identité de base. Et enfin, la qualité des eaux souterraines est de plus en plus menacée par la pollution liée à l'activité humaine d'origine domestique, industrielle et/ou agricole.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines permet de préciser d'une part, la répartition des composants et des polluants après leur dissolution et de suivre leur évolution spatio-temporelle dans l'aquifère. D'autre part, la qualité et la quantité de ces divers constituants permet de définir, préciser et/ou limiter l'aptitude de l'eau aux diverses utilisations de l'homme.

Cette annexe étudie l'hydrochimie des eaux souterraines du plateau de Mostaganem et discute de la possibilité de leur utilisation dans l'agriculture, l'industrie et l'adduction en eau potable. Les paramètres physiques mesurés sont le potentiel hydrogène (pH), le résidu sec, la minéralisation et la conductivité. Les paramètres chimiques sont les cations: le calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) et potassium (K^+) ; et les anions: chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-) et nitrates (NO_3^-).

Cette étude est basée sur des campagnes de prélèvements qui ont eu lieu entre 1993 à 2015 par la direction régionale Ouest de l'ANRH (voir données brutes dans le tableau E.1 dans l'annexe E) et ceci sur divers points de forages et puits répartis sur le plateau de Mostaganem (figure C.1).

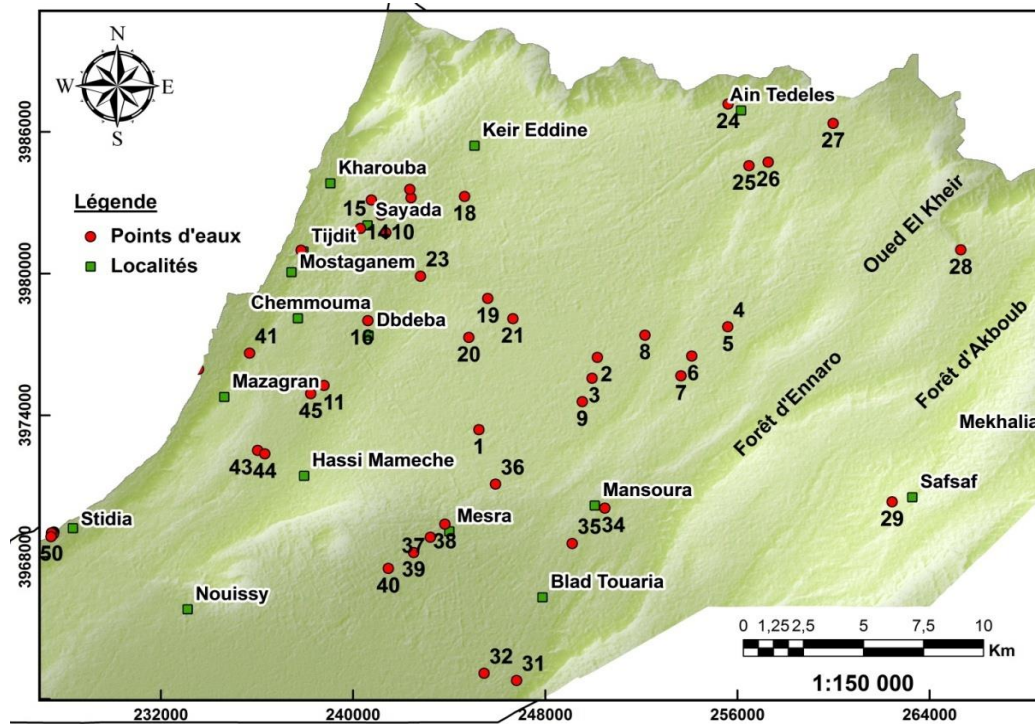


Figure C. 1. Localisation des points de prélèvement sur le plateau de Mostaganem

C.2 Analyse des balances ioniques pour le contrôle de la cohérence des analyses hydro-chimiques

Avant de traiter et d'interpréter les analyses chimiques des eaux souterraines prélevées au niveau des différents puits et forages, il faut tout d'abord vérifier leur fiabilité, la méthode généralement utilisée est celle de la balance ionique.

La balance ionique de l'eau est calculée avec la formule suivante (Ollagnier. S., Vittecoq. B., 2007):

$$\text{NICB (\%)} = [(\sum r \text{ cations} - \sum r \text{ anions}) / (\sum r \text{ cations} + \sum r \text{ anions})] \times 100 \quad (\text{C.1})$$

Où :

- NICB (Normalized Inorganic Charge Balance): La balance ionique exprimée en pourcentage,
- $\sum r \text{ cations}$: La somme des quantités en réaction des cations (unités en meq/l),
- $\sum r \text{ anions}$: La somme des quantités en réaction des anions (unités en meq/l).

Le nombre de milliéquivalents d'un ion s'obtient en divisant sa concentration en milligramme par l'équivalent. Les résultats obtenus représentent les quantités en réaction, désignées par STABLER par la lettre (r) :

$$\text{Quantité en réaction " r " (meq/l)} = \text{Poids de l'élément (mg/l)} / \text{Equivalent chimique} \quad (\text{C.2})$$

Avec: $\text{Equivalent chimique} = \text{Masse atomique} / \text{Valence}$

En théorie, rappelons qu'une eau naturelle est électriquement neutre, sa balance ionique NICB doit être proche de 0%.

En réalité, la valeur NICB est rarement égale à 0%, ceci est dû généralement à des incertitudes, à la présence de certaines valeurs non mesurées ou à d'éventuelles erreurs d'analyse. Par conséquent, un certain déséquilibre entre les anions et les cations est autorisé.

La marge d'erreur acceptable de l'équilibre ionique selon les normes d'analyse de l'eau est de $\pm 10\%$ (Ollagnier. S., Vittecoq. B., 2007; Waiter J., 2010), ainsi:

Si:

- $-1\% < \text{NICB} < 1\%$: Fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- $-5\% < \text{NICB} < 5\%$: Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- $-10\% < \text{NICB} < 10\%$: Fiabilité des résultats d'analyses médiocre.
- $\text{NICB} < -10\%$ ou $\text{NICB} > 10\%$: Mauvaise fiabilité des résultats d'analyses.

Les résultats bruts des analyses chimiques des échantillons d'eaux souterraines prélevés sur la zone d'étude sont présentés au tableau E.1 dans l'annexe E. Le calcul des quantités en réaction des cations et des anions (en meq/l) et leurs balances ioniques sont également, présentés au tableau E.2 dans l'annexe E.

La figure C.2 représente les balances ioniques calculées sur chacun des échantillons d'eau analysés. Les valeurs des balances ioniques calculées sont représentées en ordonnée (unité: %). Les échantillons analysés sont identifiés par leurs numéros de terrain.

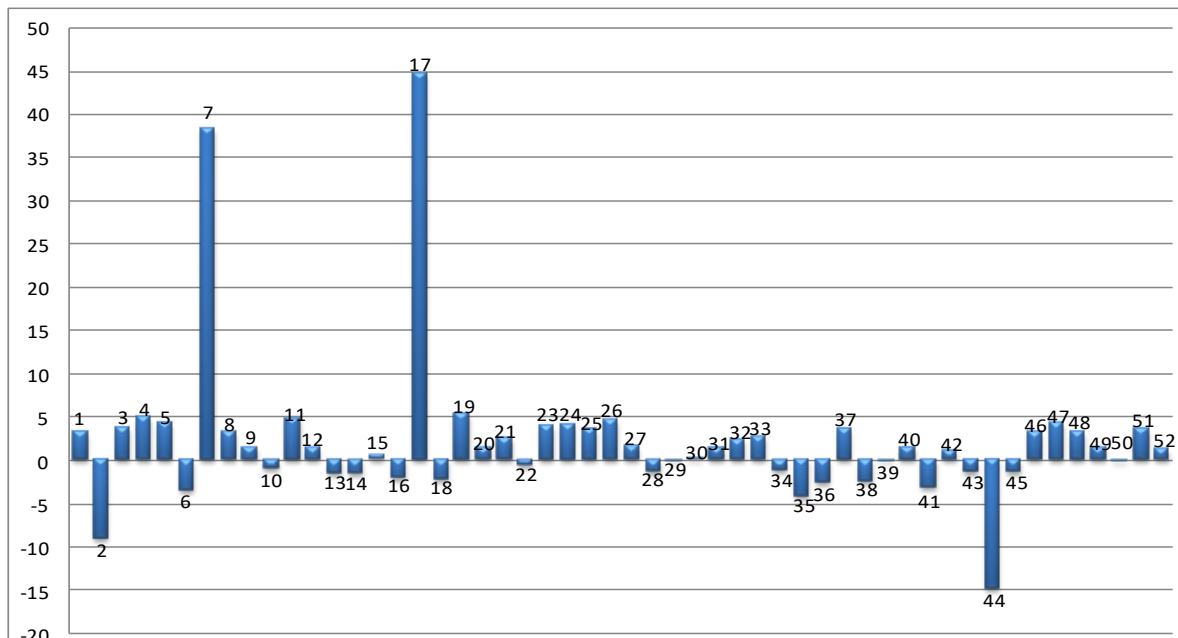


Figure C. 2. Représentation des balances ioniques calculées des points d'eaux

Dû à un déséquilibre trop important entre les anions et les cations en solution, les échantillons d'eau souterraine prélevés des puits N°17, 7 et 44, présentent respectivement les balances

ioniques de 45%, 38% et 15% ce qui dépasse de loin la fourchette de valeurs tolérable. Par conséquent, ces échantillons sont rejetés.

Les échantillons n°2 et 19, présentent respectivement, des balances ioniques de 9,01% et 5,30%. Ces balances ioniques plus élevées restent cependant dans une fourchette de valeurs tolérables.

C.3 Analyse statistique des données hydro-chimiques par L'ACP

Il existe une multitude de méthodes statistiques descriptives permettant de traiter simultanément un nombre quelconque de variables. L'Analyse en Composante Principale (ACP), très utilisée pour l'interprétation des données hydro-chimiques des eaux souterraines (El Morhit et al., 2008; Makhoukh et al., 2011; Belghiti et al., 2013), a été choisie pour l'exploration et l'analyse statistique des données hydro-chimiques de la zone d'étude. Pour cette étude, l'ACP a été réalisée à l'aide du logiciel XISTAT 2016.

L'ACP est utilisée pour identifier les similitudes ou les oppositions entre les variables et identifier les variables les plus corrélées entre elles (Ouandaogo Yameogo S., 2008). Elle consiste d'une part à trouver les directions spatiales qui représentent le mieux les corrélations entre toutes les variables, d'autre part à mieux suivre l'évolution de la chimie de l'eau et à identifier les caractéristiques dominantes du milieu (Borsali T., 2008).

Pour la suite de cette étude, et en se basant sur les résultats de la section précédente, 49 points d'eaux et 10 variables ont été prises en considération pour l'analyse statistique des données hydro-chimiques. Les 10 variables sont définies comme suite:

- Les éléments chimiques majeurs en mg/l, (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-).
- Le pH.
- La conductivité (Cond).

C.3.1 Résultats des statistiques élémentaires

Dans le tableau C.1 nous avons présenté le calcul des moyennes et des écarts-types de la série de différents éléments chimiques.

Variabes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca	20,000	291,000	116,327	62,766
Mg	6,000	117,000	44,082	25,071
Na	21,000	713,000	284,898	166,129
K	0,700	106,000	10,810	15,493
Cl	46,000	939,000	405,041	255,492
SO4	67,000	888,000	210,837	143,406
HCO3	123,000	466,000	306,388	81,296
NO3	2,000	216,000	49,980	39,149
Cond	5,000	3870,000	937,429	1282,590
pH	7,100	8,500	7,731	0,412

Tableau C. 1. Calcul des moyennes et des écarts-types de la série.

C.3.2 Matrice de corrélation

L'étude de la corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines permet de mieux comprendre certains phénomènes résultant de l'interaction eau-roche et donc avoir une idée sur l'origine commune de certains paramètres.

Les coefficients de corrélation entre les différents éléments sont regroupés dans le tableau C.2. Le calcul de la matrice de corrélation est basé sur une matrice composée des coefficients de corrélation de Pearson. Le coefficient de Pearson est le coefficient de corrélation habituellement utilisé. On admet qu'une corrélation est significative, si la valeur du coefficient de corrélation "Cr" est comprise entre [+0.5, 1] (relation positive) et entre [-0.5, -1] (relation négative).

Dans cette étude, la matrice de corrélation présente une corrélation positive de la conductivité avec le sodium (Cr=0,59) et le chlorure (Cr=0,57), ce qui est parfaitement logique, puisque c'est les chlorures et les sodiums qui sont les principaux paramètres responsables de l'acquisition de la charge saline des eaux.

Une bonne corrélation est également notée entre les chlorures et les sodiums (Cr=0,91). De bonnes corrélations existent aussi, entre (Na et SO4 (Cr=0,681), Na et Cl (Cr=0.910), Ca et Cl (Cr=0.636), Cl-Mg (Cr=0.678). En général, ces éléments font ressortir les faciès chimiques les plus importants de la région.

Le pH est corrélé négativement avec tous les ions constitutifs de la minéralisation.

Variables	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	Cond	RS	Min	PH
Ca	1											
Mg	0,484	1										
Na	0,384	0,561	1									
K	-0,003	0,129	0,148	1								
Cl	0,636	0,678	0,910	0,121	1							
SO4	0,494	0,655	0,681	0,367	0,622	1						
HCO3	0,442	0,247	0,445	-0,030	0,425	0,176	1					
NO3	0,431	0,113	0,093	-0,152	0,189	0,045	0,260	1				
Cond	0,349	0,134	0,591	0,023	0,574	0,286	0,377	0,310	1			
RS	0,723	0,677	0,890	0,174	0,958	0,762	0,466	0,248	0,566	1		
Min	0,652	0,641	0,931	0,155	0,958	0,735	0,474	0,276	0,667	0,976	1	
PH	-0,460	-0,141	-0,383	0,008	-0,444	-0,230	-0,392	-0,285	-0,659	-0,456	-0,491	1

Tableau C. 2. Matrice de corrélation des éléments chimiques.

C.3.3 Etude des variables

La figure C.3, représente l'espace des variables chimiques considérées. L'ensemble de l'information est représenté par les premiers et deuxièmes axes factoriels qui constituent 63,97% de la variance totale.

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation sauf pour le potassium (K) et les NO3). L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

Le premier axe factoriel (F1) est corrélé positivement aux éléments: Ca, Na, Cl, Mg, SO4 et HCO3 avec des degrés (abscisses) allant de 0,557 à 0,934 et d'un degré moindre aux NO3 et K. L'axe F1 est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issu de l'interaction eau-roche.

Le sodium et les chlorures évoluent dans le même sens, d'où une origine commune. En effet, ces deux minéraux peuvent être apportés par les précipitations.

Le sulfate peut provenir des précipitations atmosphériques ou par oxydation des minéraux sulfurés. On remarque sur la figure C.3 que les sulfates et les magnésiums évoluent ensemble. Par conséquent, une augmentation de la teneur en sulfate entraîne probablement l'augmentation du magnésium.

Le deuxième axe factoriel (F2), qui représente 15,14% de la variance totale, est marqué par une opposition entre le pH et les nitrates, indice de pollution agricole. Le pH est également négativement corrélé avec tout les éléments chimiques.

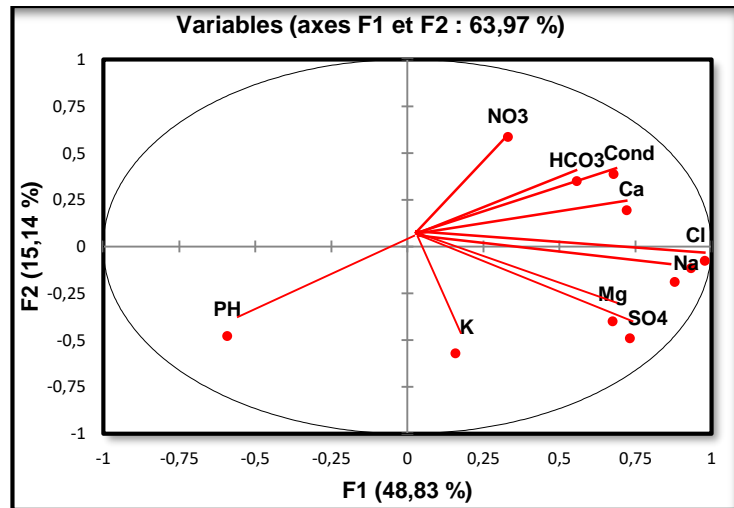


Figure C. 3. Cercle de corrélation des éléments chimiques.

C.3.4 Etude des individus

Sur le plan F1/F2 des individus (figure C.4), la majorité des échantillons se regroupent au centre du plan indiquant une minéralisation moyenne. Cependant, les points N°(2, 15 et 27) sont caractérisés par une minéralisation très importante. En effet, si on revient aux analyses chimiques brutes (voir tableau E.1, annexe E), les remarques suivantes sont faites sur ces trois points d'eaux:

- Pour le forage n°2: un pH élevé et une valeur anormalement grande de Potassium (106mg/l).
- Pour le forage n°15: une forte minéralisation et une valeur des nitrates très élevée (216mg/l).
- Pour le forage n°27: une forte minéralisation et une forte valeur des sulfates (888mg/l).

Les deux facteurs montrent donc que les eaux souterraines de la région suivent un seul processus dans la dissolution des minéraux et sont supposés être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau lié à l'interaction eau-roche.

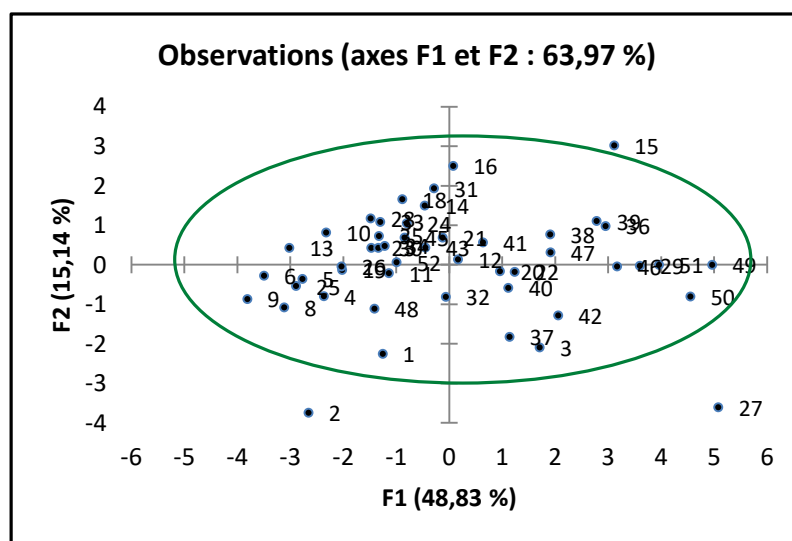


Figure C. 4. Graphe des individus (forages et puits).

C.4 Evolution spatiale des paramètres chimiques des eaux souterraines

L'étude des paramètres chimiques et l'établissement des cartes d'isoteneurs des éléments chimiques permettent de mieux suivre leurs évolutions à travers toute la zone d'étude.

C.4.1 Minéralisation

La minéralisation sur le plateau de Mostaganem est comprise entre 310mg/l au forage n°7 (F4Bis-Mostaganem-) et 2937mg/l au puits n° 49 (P4-Stidia-). Les eaux deviennent plus chargées entre la Forêt d'Ennaro et de l'Akboube et dans la partie Sud-Ouest du secteur Bel Hacel. Aussi, une forte minéralisation est observée au Sud-Ouest du plateau de Mostaganem, plus précisément au niveau des forages de Stidia où sa valeur atteint les 2937mg/l. À ces endroits, la minéralisation augmente selon le sens d'écoulement des eaux, où plus loin, les circulations deviennent plus lentes et les eaux restent plus longtemps en contact avec la roche, ceci est bien confirmé par la baisse du gradient hydraulique de la carte piézométrique. Le même phénomène est observé dans la localité de Kheir Eddine où la concentration devient plus importante pouvant atteindre 1984 mg/l au forage n°17 (voir figure C.5).

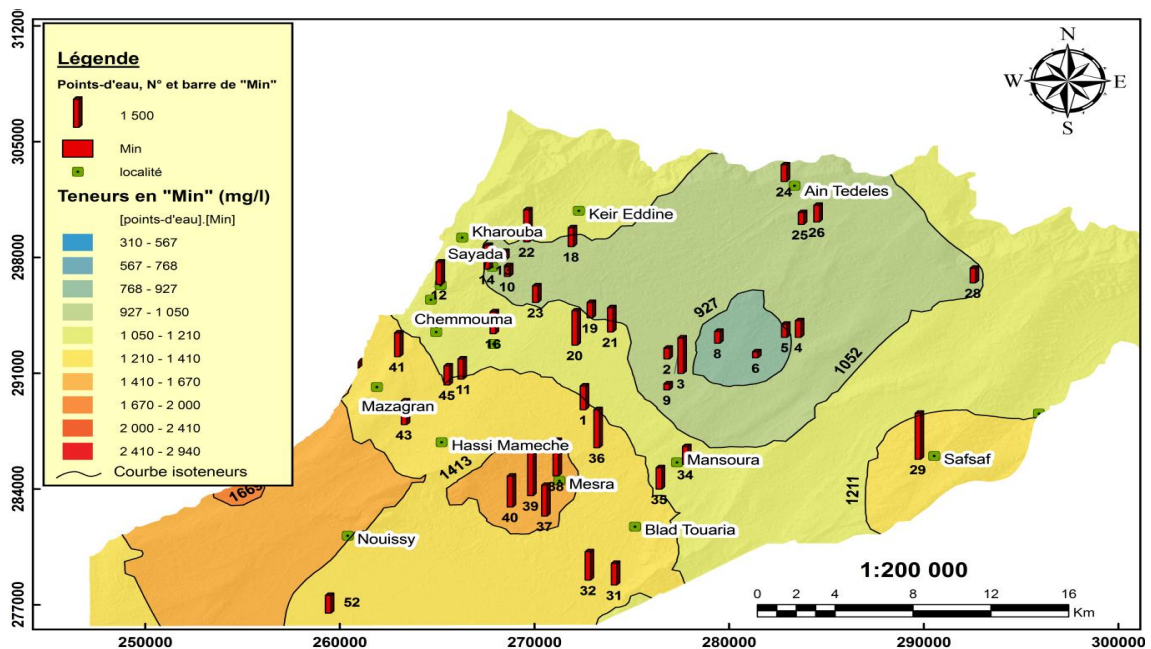


Figure C. 5. Carte d'isoteneur en minéralisation dans le plateau de Mostaganem

C.4.2 Teneur en Calcium (Ca)

L'origine de cet élément est liée généralement à la lithologie du terrain. Les eaux souterraines au contact avec les roches se chargent en Calcium qui provient surtout de la mise en solution de la calcite (CaCO_3), de la dolomite, de l'anhydrite et du gypse.

Sur la figure C.6, l'évolution du Calcium devient importante vers le Nord-Ouest du plateau de Mostaganem, notamment à la localité de kheir Eddine avec une grande valeur de 451mg/l au

point n°17 (puits Kheir Eddine). Des valeurs importantes sont aussi enregistrées dans le sud du plateau aux localités Mesra. Sa concentration évolue dans le même sens que le gradient hydraulique de la nappe.

Il faut savoir qu'une eau potable de bonne qualité renferme de 100 à 400 mg/l de calcium. Les eaux qui dépassent une teneur de 200 mg/l de calcium présentent de sérieux inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation des chaudières, ce qui n'est pas le cas de notre zone d'étude.

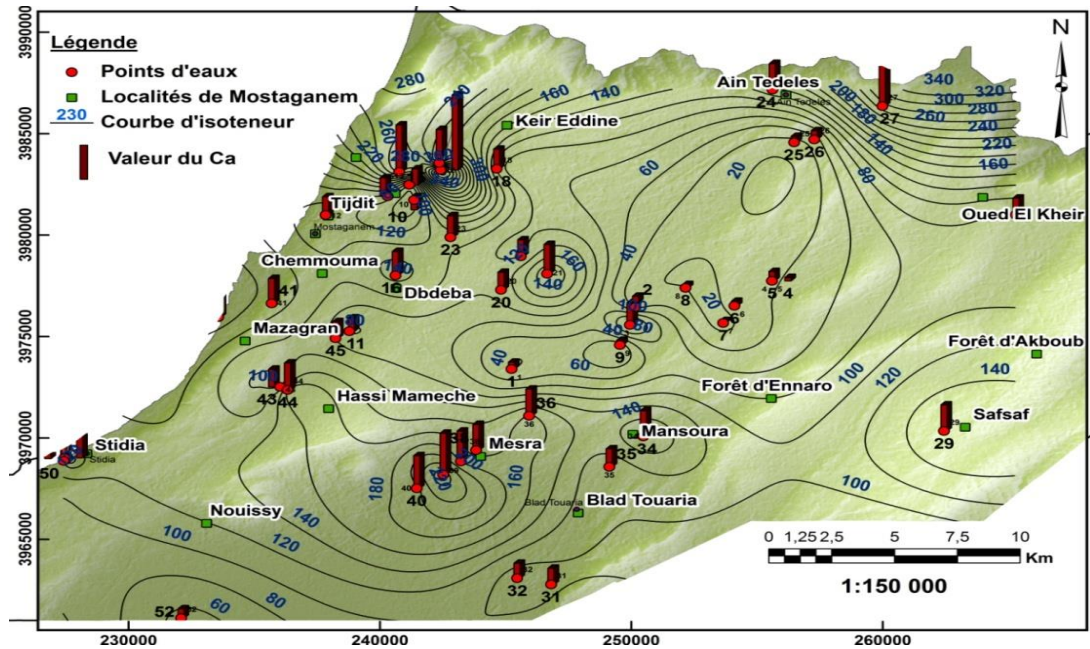


Figure C. 6. Carte d'isoteneur en Calcium dans le plateau de Mostaganem

C.4.3 Teneur en Magnésium (Mg)

La teneur en Magnésium varie de 17mg/l au forage n°35 (F-Mansoura-) à 237mg/l au puits n°17 (Kheir Eddine).

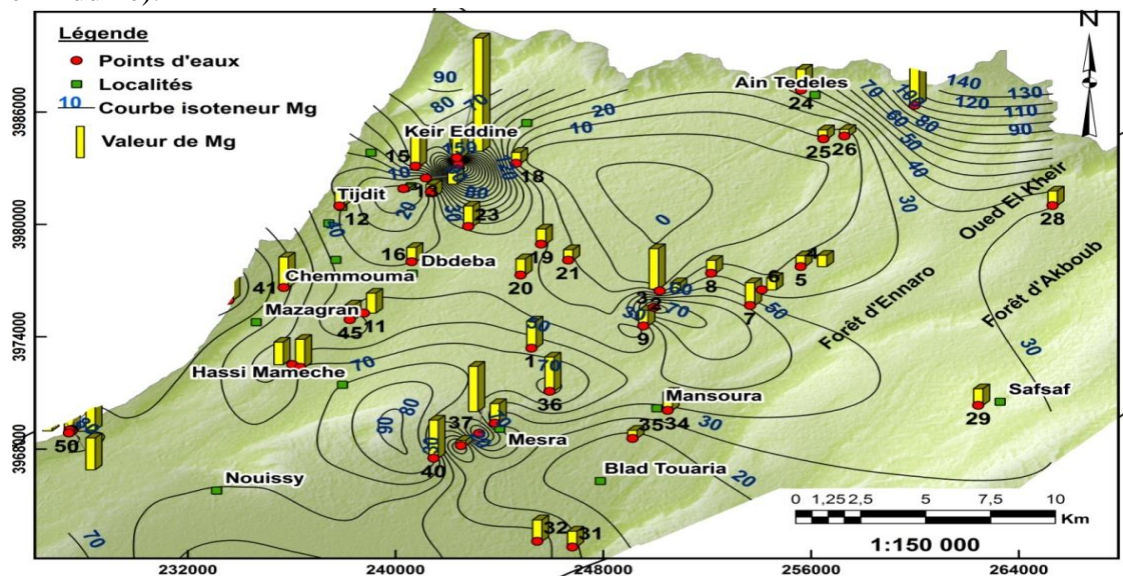


Figure C. 7. Carte d'isoteneur en Magnésium dans le plateau de Mostaganem

Elle évolue de la même façon que celle du calcium, mais avec des valeurs moins importantes (figure C.7).

C.4.4 Teneur en Sodium (Na)

La teneur en Sodium, dans le plateau de Mostaganem, varie de 46 mg/l au forage n° 9 (F6 - Mostaganem-) à 713mg/l au puits n°49 (P4 -Stidia-).

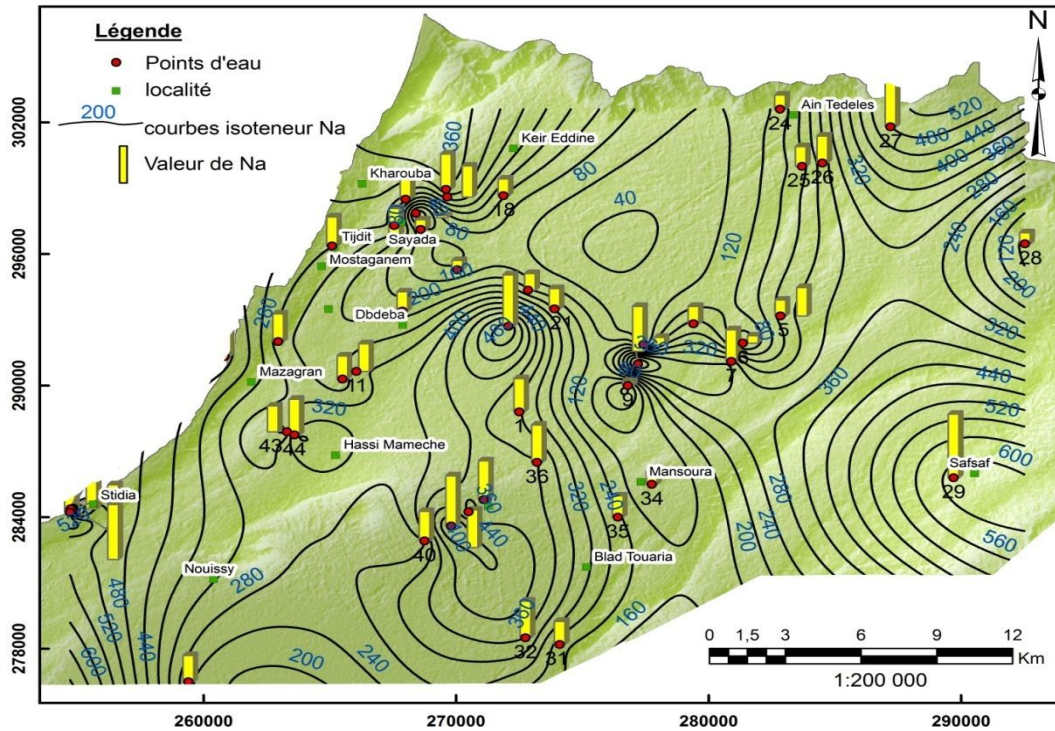


Figure C. 8. Carte d'isoteneur en Sodium dans le plateau de Mostaganem

Sa présence est due probablement à la circulation des eaux dans les sables et les sables argileux des formations alluviales du Quaternaire. La forte variation de cet élément d'un endroit à un autre est due certainement soit au lessivage des sables argileux très abondant, soit à la perméabilité de ces formations. Son évolution se fait en général dans le même sens que l'écoulement des eaux souterraines. Les valeurs les plus importantes sont localisées dans la partie Sud-Ouest du plateau de Mostaganem, notamment au niveau de Mesra, Stidia et Hassi Mameche (voir figure C.8).

C.4.5 Teneur en Potassium (K)

La teneur en potassium varie de 2mg/l aux forages (6, 8, 9, 10 et 18) à 106mg/l au forage n°2 (F2-Mostaganem-). La concentration en Potassium évolue dans le même sens de l'écoulement de la nappe. Elle devient importante dans la partie Sud-Ouest, notamment au: Stidia, Mazagran et au Nord du plateau à Ain Tedeles et Sour (voir figure C.9).

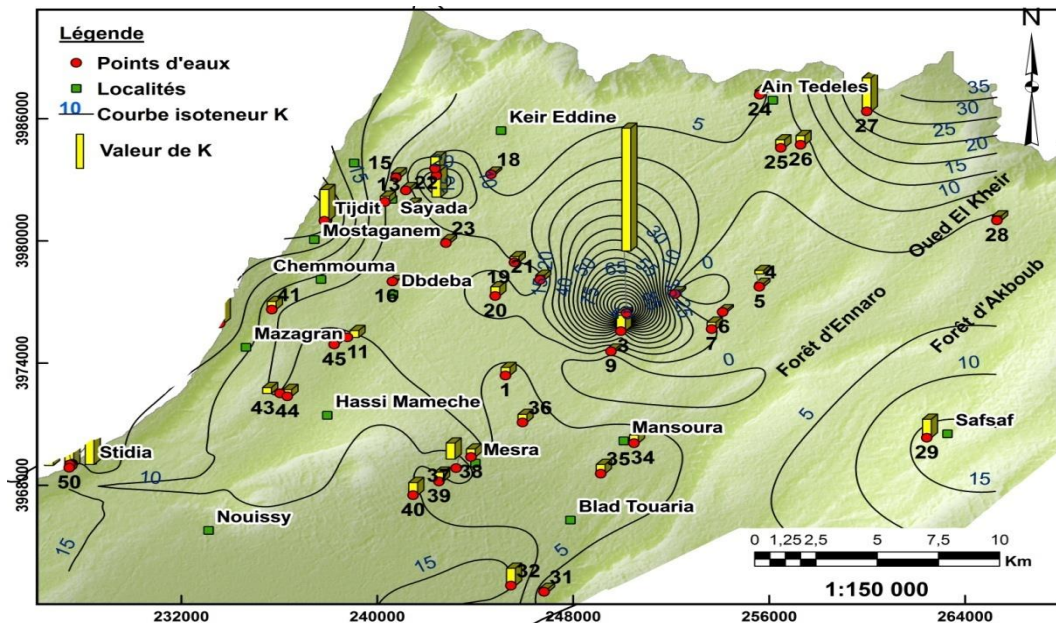


Figure C. 9. Carte d'isoteneur en Potassium dans le plateau de Mostaganem

C.4.6 Teneur en Chlorure (Cl)

Les chlorures peuvent avoir deux origines : les apports atmosphériques et la dissolution des évaporites salées. L'eau de pluie peut apporter avec elle des chlorures d'origine maritime qui s'accumulent en surface et sont ensuite emportés dans les aquifères. De plus, certaines catégories d'évaporites sont faciles à dissoudre et peuvent fournir de grandes concentrations dans l'eau.

La carte d'isoteneur en chlorure (figure C.10) présente de forte similitude avec la carte des minéralisations (figure C.5), avec des fortes valeurs à Hassi Mameche et Mesra. L'évolution de cet élément se fait dans le même sens de l'écoulement de la nappe. Ces ions chlorurés peuvent avoir plusieurs origines dont les plus importantes sont :

- La nature lithologique, notamment, les marnes du Plio-Quaternaire.
- Origine liée à l'activité humaine.
- Intense évaporation des eaux.

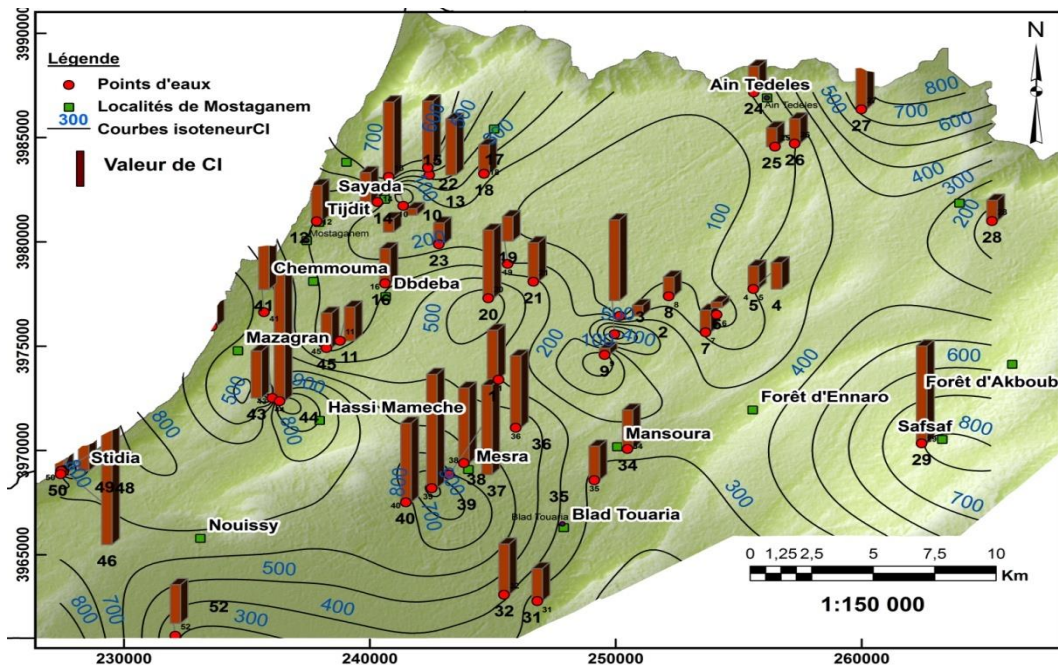


Figure C. 10. Carte d'isoteneur en Chlorure dans le plateau de Mostaganem

C.4.7 Teneur en Sulfate (SO₄)

Les sulfates peuvent être d'origine météorique ou provenir de l'activité agricole, l'activité biologique naturelle, l'utilisation domestique (détergents), ou de la présence d'évaporites (gypse).

Les teneurs en Sulfates, dans la zone d'étude (figure C.11), varient de 14 mg/l au forage n°7 (F4 Bis-Mostaganem-) à 888mg/l au forage de n°27.

Les zones à forte valeur de sulfate, sur la figure C.11, correspondent à des zones de cultures maraîchères, à forte utilisations d'engrais (Hassi Mameche, Mesra, Stidia, Safsaf, Mazagran).

C.4.8 Teneur en Bicarbonate (HCO₃)

Les bicarbonates sont des dérivés de l'acide carbonique formés par la réaction d'un CO₂ sur un carbonate en présence d'eau.

Leurs présences sur la zone d'étude sont dues probablement au lessivage des formations sableuses du Quaternaire ou des grés du Calabrien. Sa concentration varie de 171mg/l au forage n°3 (F2 Bis-Mostaganem-), à 473 mg/l au puits n°17 (Kheir Eddine). Son évolution se fait en général suivant le sens d'écoulement de la nappe (Voir figure C.12).

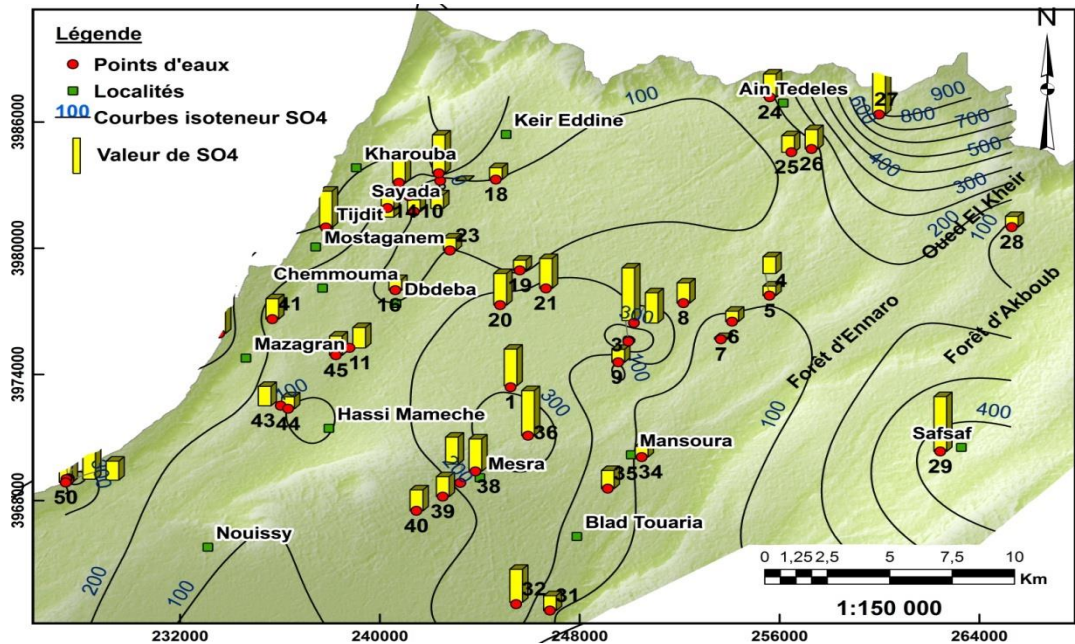


Figure C. 11. Carte d'isoteneur en Sulfate dans le plateau de Mostaganem

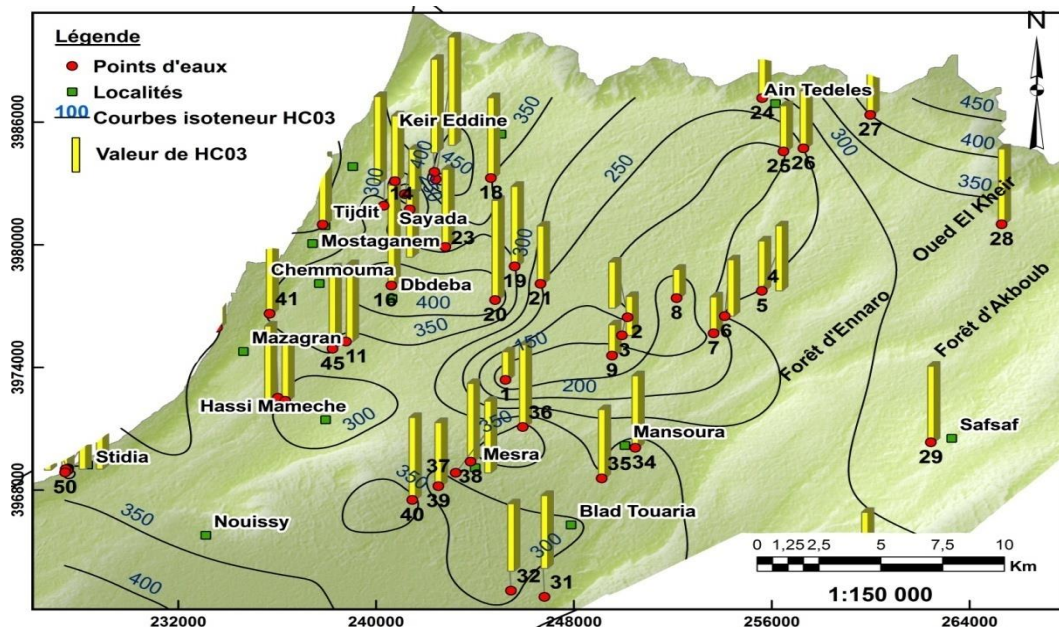


Figure C. 12. Carte d'isoteneur en Bicarbonate dans le plateau de Mostaganem

C.4.9 Teneur en Nitrate (NO₃)

Les concentrations de nitrates augmentent avec l'activité humaine, comme l'industrie et surtout l'agriculture. La sur-fertilisation des cultures pour intensifier l'activité agricole, ou une large diffusion des cultures qui nécessitent de fortes doses d'engrais, laisse un excès dans le sol.

La valeur la plus élevée et qui dépasse de loin les normes admissibles de l'OMS (50 mg/l) est égale à 216 mg/l. Elle est enregistrée au forage n°15 (F Douar Henni- Sayada-) (voir figure C.13).

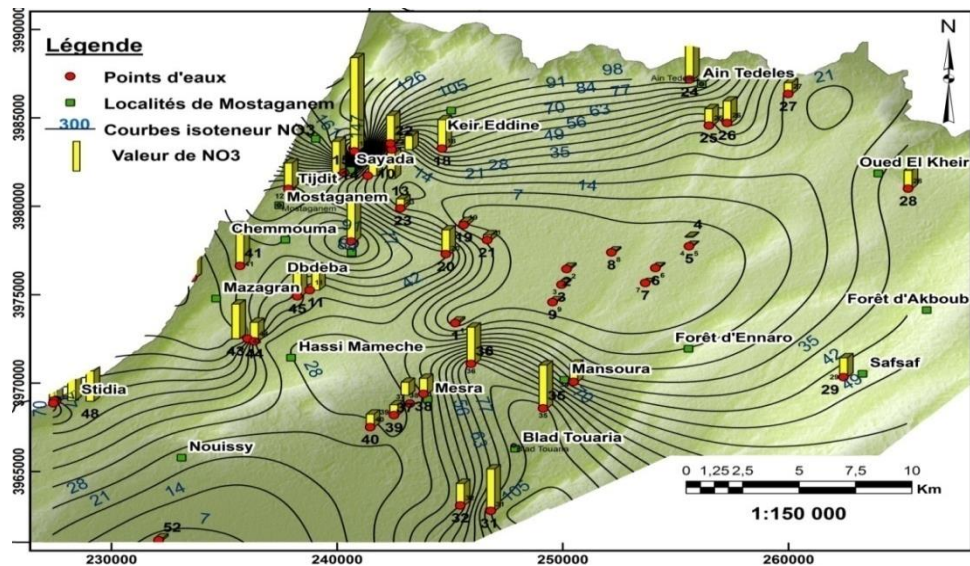


Figure C. 13. Carte d'isoteneur en Nitrate dans le plateau de Mostaganem

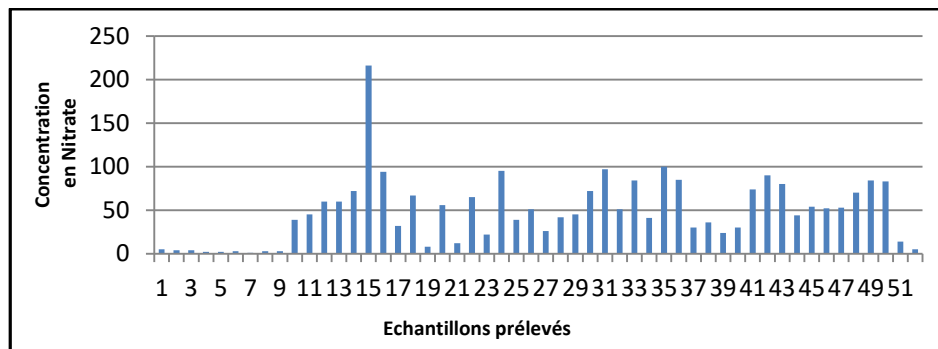


Figure C. 14. Variation des Nitrates dans le plateau de Mostaganem.

Environ la moitié (50%) des échantillons prélevés sur la zone d'étude dépassent les normes admissibles (voir figure C.14).

C.5 Caractères physiques des eaux souterraines

C.5.1 Potentiel hydrogène (PH)

Le potentiel hydrogène (pH) mesure la concentration en ion H^+ de l'eau. Il représente l'équilibre entre l'acide et la base sur une échelle de 0 à 14. La valeur 7 étant le pH de neutralité (autant d'ions H^+ que d'ions H^-). A l'exception de certains effluents industriels, il est rare que le pH soit une contre indication à la potabilité des eaux.

Le pH des eaux naturelles dépend de la nature géologique du terrain qu'elles traversent. L'eau qui se développe en milieu carbonaté a un pH élevé, tandis que l'eau issue de sols pauvres en calcaire ou siliceux a un pH proche de 7 et parfois un peu plus bas (autour de 6). Le pH représente donc, l'état de l'équilibre carbonique. Le CO_2 libre qui est dissous dans l'eau forme un acide faible qui génère la baisse du pH; il interagit avec les bases pour constituer des carbonates acides, quasiment insolubles et des bicarbonates énormément solubles.

Par définition, le pH est le cologarithme de la concentration en ion hydrogène. Il est calculé à l'aide d'un pH-mètre au Laboratoire.

$$\text{pH} = -\text{Log} [\text{H}_3\text{O}^+] \quad (\text{C.3})$$

Classification des eaux d'après le pH :

- pH < 7 : Eau Acide.
- pH = 7 : Eau neutre.
- pH > 7 : Eau Basique.

Selon la teneur en Calcium et en Magnésium, le pH remonte au fur et à mesure de la neutralisation du CO₂ par l'une ou l'autre base.

Pour les échantillons prélevés sur la zone d'étude, le pH varie de 7.1 à 8.9 puits n°7 (près de la ville de Mostaganem, voir figure C.15); soit une certaine tendance à la basicité des eaux.

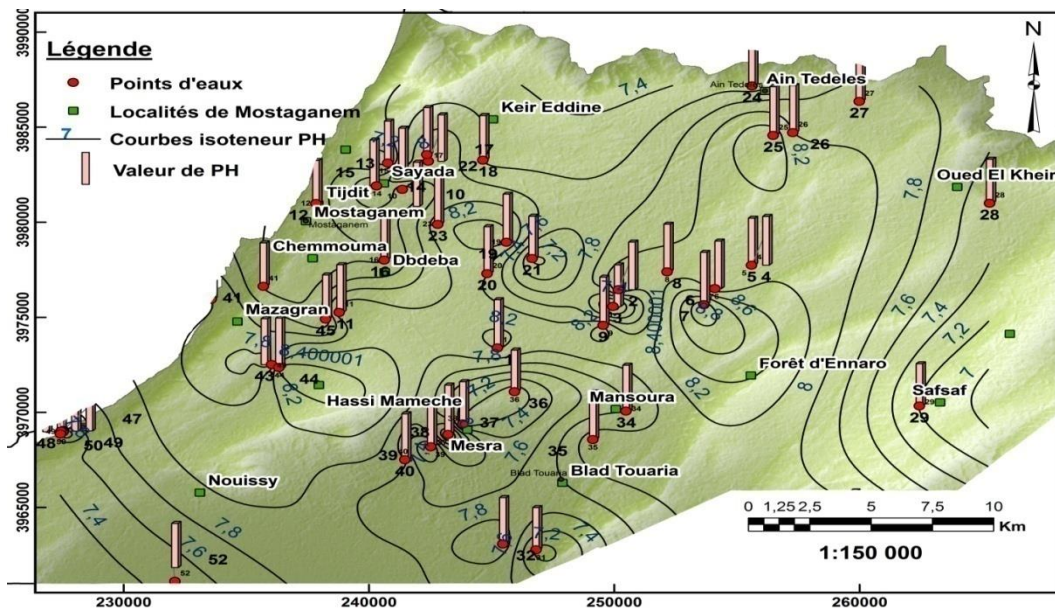


Figure C. 15. Carte d'isoteneur en PH dans le plateau de Mostaganem

C.5.2 Conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire l'électricité entre deux électrodes. C'est l'inverse de la résistivité électrique. La mesure de ce paramètre permet une évaluation rapide mais très approximative de la minéralisation globale et un suivi de son évolution. Ainsi, la conductivité des eaux naturelles est fonction de la teneur en sels électrolytiques dissous. Les valeurs suivantes donnent une indication sur le degré de minéralisation de l'eau souterraine en fonction de la valeur de conductivité mesurée:

- Conductivité < 100 μ S/cm (micro Siemens/cm): minéralisation très faible.
- 100 μ S/cm < Conductivité < 200 μ S/cm : minéralisation très faible.
- 200 μ S/cm < Conductivité < 333 μ S/cm : minéralisation moyenne accentuée.

- $333 \mu\text{s/cm} < \text{Conductivité} < 666 \mu\text{s/cm}$: minéralisation moyenne.
- $\text{Conductivité} > 1000 \mu\text{s/cm}$: minéralisation excessive.

En ce qui concerne les eaux étudiées, on constate que la valeur de la conductivité varie de $5 \mu\text{s/cm}$ au forage n°6 (F4-Mostaganem-) à $3870 \mu\text{s/cm}$ au puits n°49 (P4-Stidia-), ce qui traduit une forte minéralisation au sud-ouest du plateau de Mostaganem (voir figure C.16).

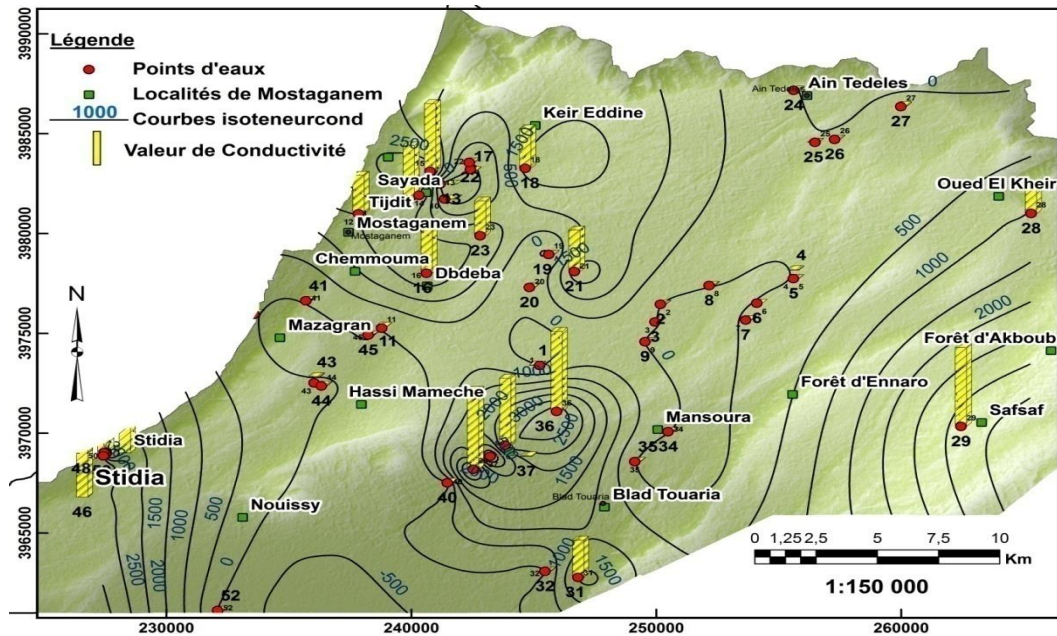


Figure C. 16. Carte d'isovaleur en conductivité dans le plateau de Mostaganem

C.5.3 Résidu sec

Le résidu sec reflète la minéralisation totale de l'eau, c'est-à-dire, tous les sels dissous et les substances organiques contenues dans l'eau. Ses valeurs peuvent être vérifiées à l'aide de la mesure de conductivité. Les résultats de la mesure dépendent de la température et le temps de séchage.

Pour des raisons de goût, l'organisation mondiale de la santé conseille une valeur limite de 1000 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine. Dans les pays à climat semi aride et aride cette valeur est généralement très dépassée.

D'après la carte d'isoteneur en résidu sec (Figure C.17), la valeur minimum de résidu sec est constatée au niveau du forage n°6 (F4 -Mostaganem-) avec une valeur de 460 mg/l pour atteindre un maximum de 4040 mg/l au puits n°17 (Kheir Eddine).

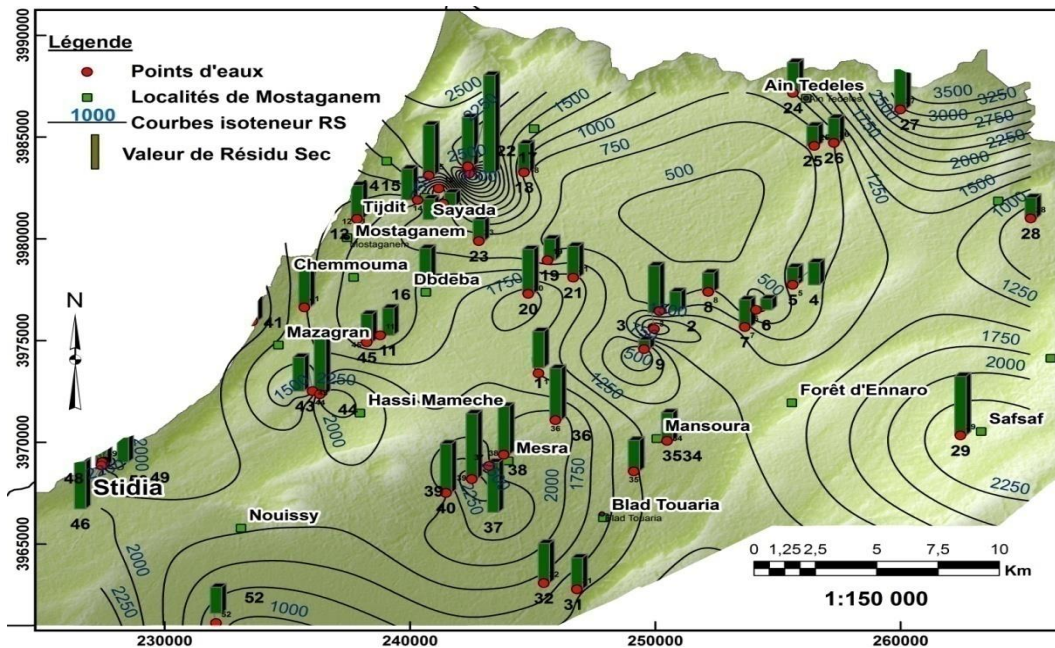


Figure C. 17. Carte d'isoteneur en résidu sec dans le plateau de Mostaganem

C.6 Etude des rapports caractéristiques

L'étude des rapports caractéristiques concerne les rapports suivants :

(SO₄/Cl) ; (Na/Cl) et (Mg/Ca). Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau C.3.

C.6.1 Rapport rSO_4^{-2} / rCl^{-}

Le rapport rSO_4 / rCl est toujours inférieur à 1 sauf aux points d'eaux 2, 6, 9 et 13, il varie de 0.06 à 2,06. Ceci permet de dire que l'eau de la région est plus chlorurée que sulfatée. D'autre part, l'augmentation anormale de ce rapport dans le secteur Nord-Ouest est liée directement par l'utilisation excessive des engrais artificiels pour les terres agricoles (figure C.18).

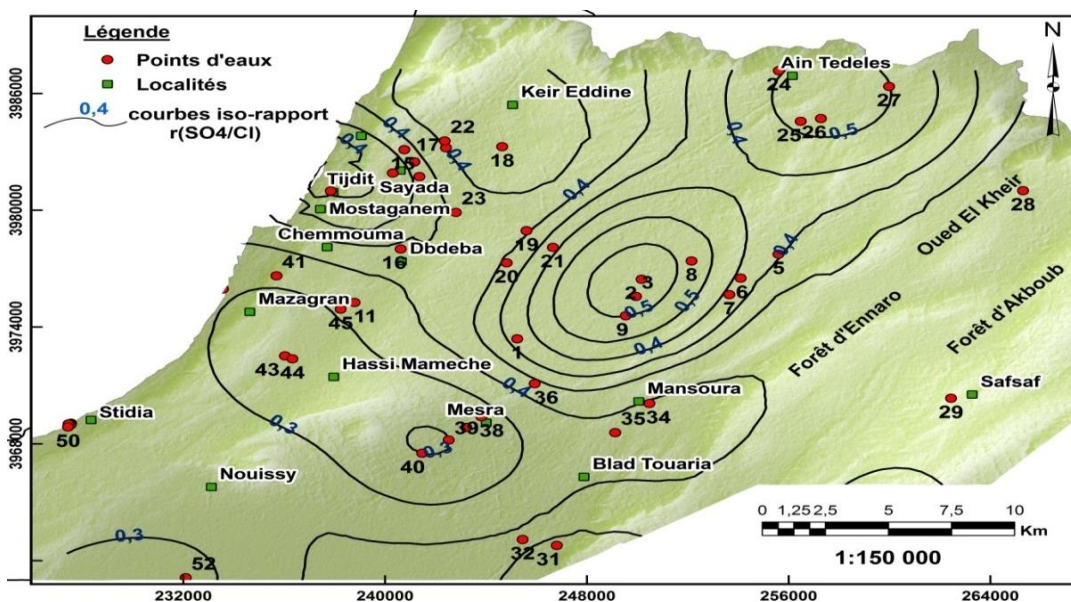


Figure C. 18. Carte d'isoraapport de rSO_4^{-2} / rCl^{-}

C.6.2 Rapport rNa^+ / rCl^-

Les résultats obtenus montrent une claire dominance du sodium sur les chlorures. Ce rapport Na/Cl est assez stable. Ainsi, la majorité des eaux de la région ont tendance à être plus sodiques que chlorurées. Les points 6 et 7 ont un rapport est supérieur à 2 au sud de Ain Tedeles et à l'ouest de la forêt d'Ennaro (figure C.19).

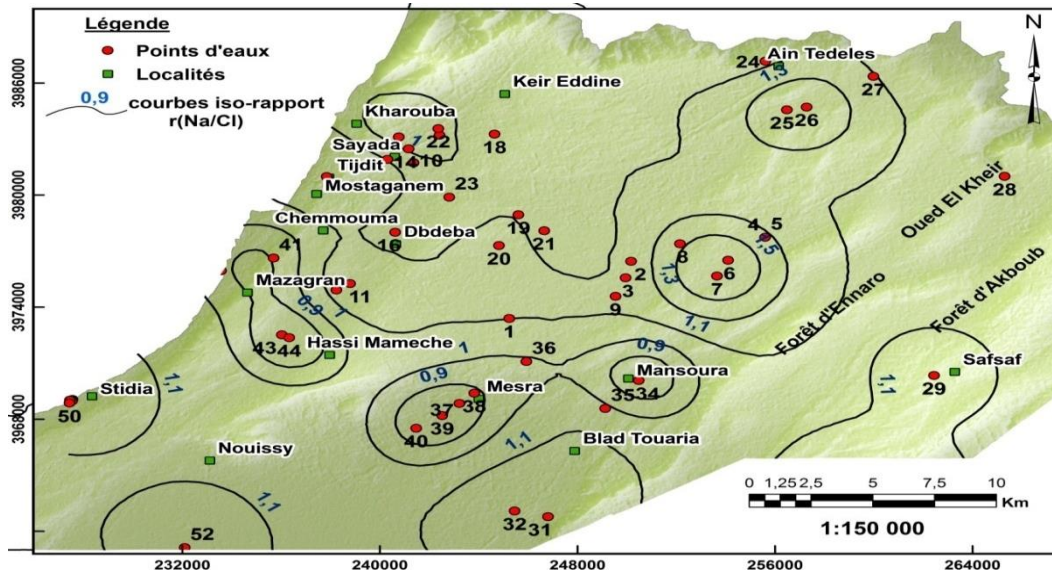


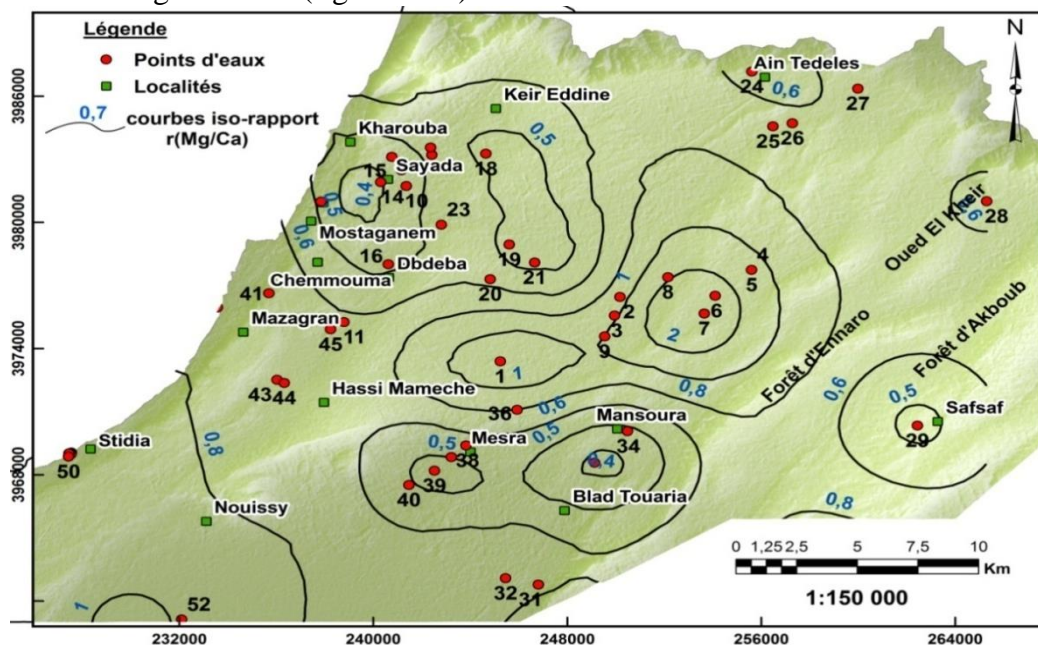
Figure C. 19. Carte d'isorapport de rNa^+ / rCl^-

Point d'eau	r (SO ₄ ²⁻ /Cl)	r (Na/Cl)	r (Mg/Ca)	Point d'eau	r (SO ₄ ²⁻ /Cl)	r (Na/Cl)	r (Mg/Ca)
1	0,53	1,22	2,23	27	0,90	1,10	0,66
2	2,06	1,23	0,74	28	0,37	0,98	0,51
3	0,47	1,01	1,09	29	0,41	1,18	0,37
4	0,46	1,96	1,98	30	0,45	1,69	0,88
5	0,30	1,26	0,68	31	0,33	1,29	0,54
6	1,35	2,38	1,53	32	0,47	1,31	0,82
7	0,06	2,59	5,64	33	0,18	0,95	0,37
8	0,75	1,64	2,22	34	0,20	0,58	0,40
9	1,36	1,26	1,94	35	0,38	1,14	0,26
10	0,63	1,29	0,53	36	0,45	0,94	0,74
11	0,43	1,48	0,86	37	0,22	0,76	0,86
12	0,73	1,46	0,45	38	0,31	0,94	0,44
13	1,50	0,60	0,41	39	0,13	0,80	0,07
14	0,55	1,65	0,09	40	0,19	0,68	0,67
15	0,27	0,63	0,38	41	0,22	0,74	0,70
16	0,22	1,00	0,34	42	0,35	0,91	0,81
17	0,01	1,01	0,87	43	0,30	0,99	0,73
18	0,30	1,05	0,32	44	0,06	0,49	0,60
19	0,30	1,23	0,53	45	0,40	1,20	0,51
20	0,33	1,37	0,53	46	0,41	1,26	0,88
21	0,55	0,94	0,21	47	0,44	1,29	0,88
22	0,41	0,96	0,41	48	0,30	1,01	1,96
23	0,43	0,79	0,54	49	0,30	1,17	0,76
24	0,64	0,99	0,46	50	0,36	1,05	1,12
25	0,63	1,90	0,87	51	0,16	1,11	1,25
26	0,57	1,97	0,44	52	0,18	1,23	1,32

Tableau C. 3. Rapports caractéristiques des eaux des points de prélèvement

C.6.3 Rapport rMg^{++}/rCa^{++}

D'après ce rapport, l'ensemble des eaux de la région sont plus calcique que magnésienne. Le rapport rMg/rCa étant inférieur à 1 sur toute la région, sauf au niveau du point n°7 où les eaux deviennent très magnésiennes (figure C.20).

Figure C. 20. Carte d'isorapport de rMg^{++}/rCa^{++}

C.7 Classification hydrochimique

Pour mieux connaître les principaux aspects hydro-chimiques, il convient d'interpréter les résultats par des représentations graphiques qui nous permettent de comparer facilement plusieurs eaux entre elles.

C.7.1 Représentation par le diagramme de Schøeller- Berkaloff

Il s'agit d'un graphique logarithmique qui nous permet de tracer une gamme d'eaux à différentes concentrations et avec une grande précision. Il nous permet d'effectuer des conversions des résultats des milligrammes par litre (mg/l) en milliéquivalents par litre (meq/l).

Les valeurs des analyses chimiques des eaux étudiées reportées sur le diagramme de Schøeller-Berkaloff (figures C.21 et C.22) nous ont permis de distinguer six faciès :

- Faciès chloruré sodique: au niveau de la majorité du plateau de Mostaganem.
- Faciès bicarbonaté calcique: au niveau des puits 13, 23 et 28.
- Faciès bicarbonaté sodique : au niveau des puits 6 et 19.
- Faciès bicarbonaté magnésien : au niveau du puits 9,
- Faciès chloruré calcique : au niveau des puits 21 et 24.
- Faciès sulfaté sodique : au niveau des puits 2.

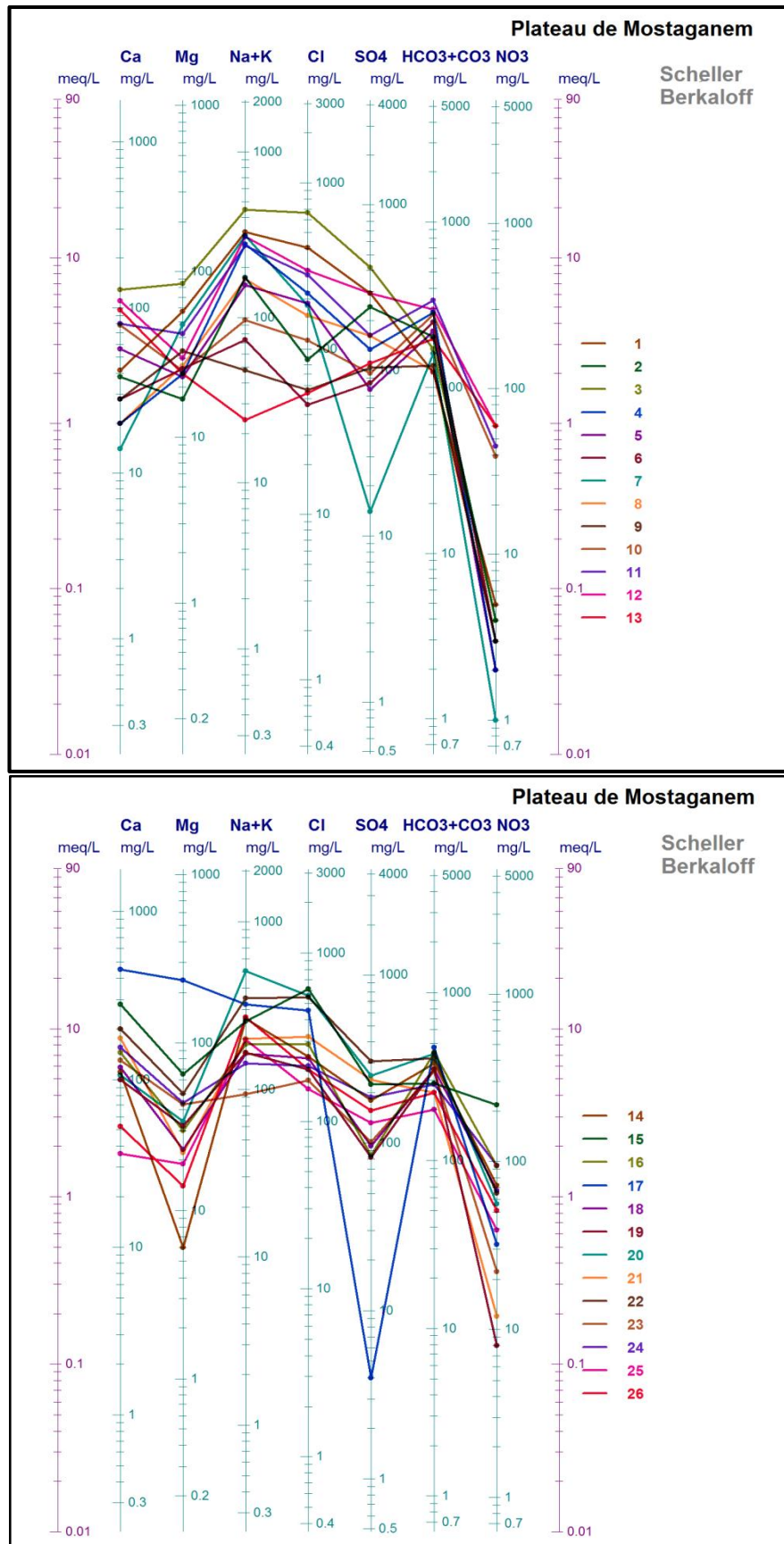


Figure C. 21. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff (partie1)

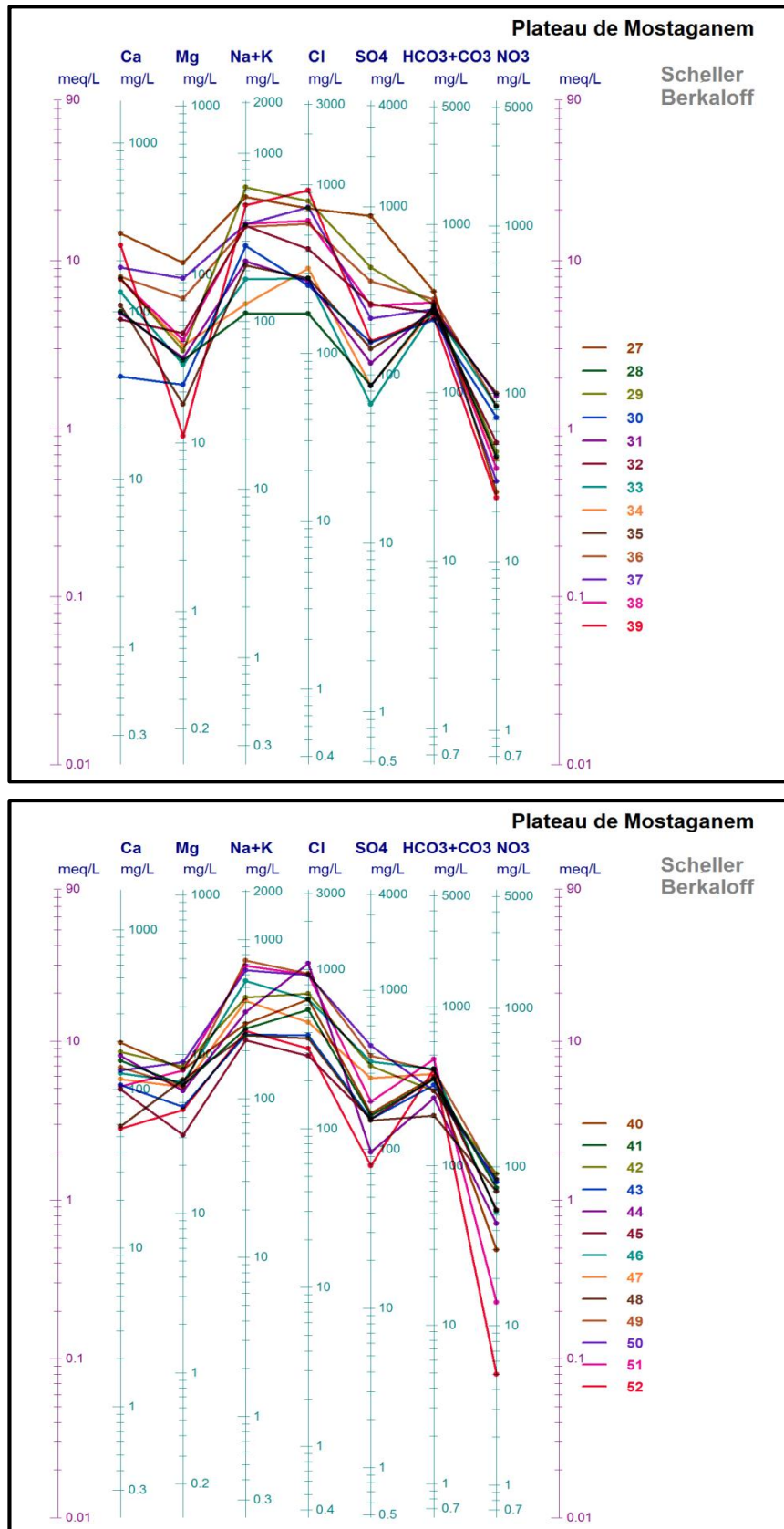


Figure C. 22. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller–Berkaloff (partie2)

C.7.2 Représentation par le digramme de Piper

Cette méthode consiste à dessiner deux triangles correspondant respectivement aux cations et aux anions, et un losange qui résume les deux triangles. Le triangle de gauche représente les cations et celui de droite les anions. La base du triangle des cations représente le calcium, le côté gauche représente le magnésium et le côté droit représente le sodium et le potassium. Pour le triangle des anions, la base représente le chlorure, le côté gauche représente le carbonate et le bicarbonate et le côté droit représente le sulfate. Selon la localisation de l'échantillon, les faciès hydrochimiques peuvent être identifiés. Ces faciès constituent l'aspect chimique des solutions présentes dans le système hydrologique et sont expliqués dans le schéma suivant :

Ce diagramme (figure.C.23) présente l'avantage de regrouper un grand nombre d'analyses. Les résultats obtenus confirment les faciès déjà signalés à la section C.7.1.

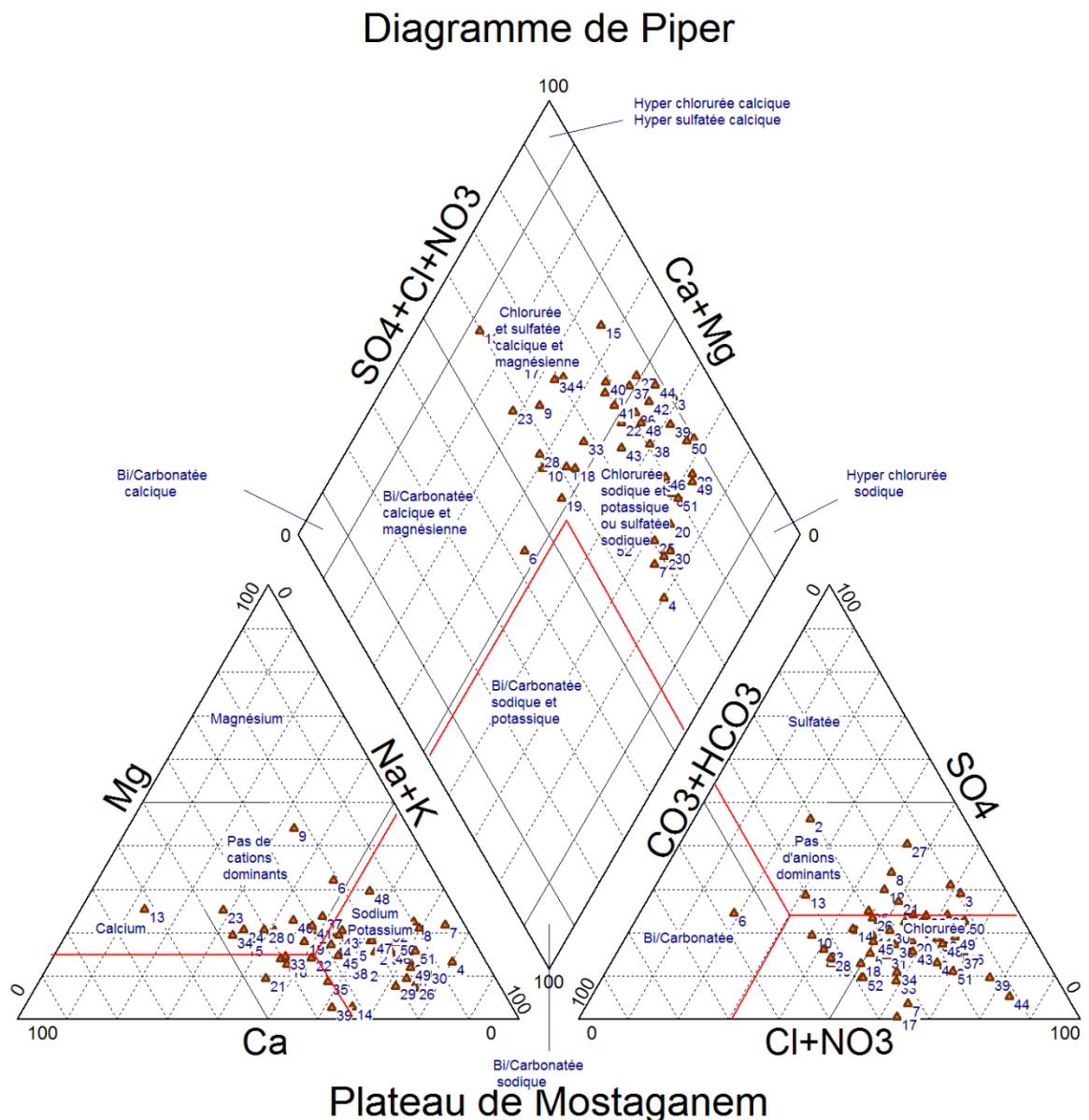


Figure C. 23. Représentation graphique des analyses chimiques sur le diagramme de Piper

N°	Ca[meq/l]	Mg[meq/l]	Na[meq/l]	K[meq/l]	HCO3[meq/l]	Cl[meq/l]	SO4[meq/l]	NO3[meq/l]
1	2.10	4.69	14.01	0.18	2.02	11.45	6.10	0.08
2	1.90	1.40	3.00	2.71	3.31	2.43	5.00	0.06
3	6.39	6.99	18.79	0.41	2.80	18.62	8.74	0.06
4	1.00	1.97	11.92	0.08	4.67	6.06	2.79	0.03
5	2.79	1.89	6.70	0.08	3.59	5.30	1.60	0.03
6	1.40	2.14	3.09	0.05	4.05	1.30	1.75	0.05
7	0.70	3.95	13.31	0.15	2.62	5.13	0.29	0.02
8	1.00	2.22	7.31	0.05	2.07	4.46	3.35	0.05
9	1.40	2.72	2.00	0.05	2.21	1.58	2.14	0.05
10	3.89	2.06	4.09	0.05	4.51	3.16	2.00	0.63
11	3.99	3.46	11.61	0.15	5.52	7.81	3.39	0.73
12	5.49	2.47	12.22	0.69	4.88	8.35	6.06	0.97
13	4.79	1.97	0.91	0.08	3.23	1.52	2.29	0.97
14	5.54	0.49	11.22	0.13	6.21	6.80	3.75	1.16
15	14.07	5.35	10.92	0.10	4.69	17.32	4.66	3.48
16	7.19	2.47	8.09	0.02	7.19	8.07	1.77	1.52
17	22.51	19.50	13.01	0.59	7.75	12.89	0.08	0.52
18	5.89	1.89	7.00	0.05	5.77	6.66	2.00	1.08
19	4.99	2.63	7.00	0.13	5.74	5.70	1.71	0.13
20	5.29	2.80	21.62	0.20	7.15	15.77	5.25	0.90
21	8.78	1.81	8.53	0.10	4.15	9.03	4.96	0.19
22	9.98	4.11	14.79	0.26	6.69	15.40	6.39	1.05
23	6.49	3.54	3.91	0.08	5.57	4.94	2.10	0.35
24	7.78	3.62	6.00	0.10	4.67	6.04	3.89	1.53
25	1.80	1.56	8.31	0.18	3.28	4.37	2.75	0.63
26	2.59	1.15	11.31	0.20	4.13	5.73	3.25	0.82
27	14.52	9.63	22.53	0.74	6.56	20.48	18.49	0.42
28	4.99	2.55	4.70	0.10	5.41	4.80	1.79	0.68
29	7.83	2.88	26.62	0.41	5.46	22.48	9.12	0.73
30	2.05	1.81	12.09	0.10	4.43	7.14	3.25	1.16
31	4.84	2.63	9.70	0.08	5.23	7.53	2.46	1.56
32	4.49	3.70	15.40	0.38	4.83	11.73	5.50	0.82
33	6.49	2.39	7.53	0.13	5.05	7.87	1.40	1.35
34	7.73	3.13	5.22	0.18	5.16	9.03	1.79	0.66
35	5.39	1.40	9.00	0.20	4.93	7.87	3.00	1.61
36	8.03	5.92	15.66	0.18	5.90	16.61	7.50	1.37
37	9.08	7.82	15.79	0.36	5.15	20.65	4.50	0.48
38	7.73	3.37	16.31	0.18	5.61	17.38	5.39	0.58
39	12.38	0.91	21.01	0.20	4.56	26.26	3.31	0.39
40	9.78	6.58	12.40	0.28	5.92	18.28	3.50	0.48
41	7.49	5.27	11.61	0.18	5.79	15.77	3.39	1.19
42	8.48	6.91	18.01	0.51	4.88	19.86	7.00	1.45
43	5.29	3.87	10.79	0.13	5.29	10.86	3.21	1.29
44	8.08	4.86	15.01	0.15	4.38	30.80	2.00	0.71
45	4.99	2.55	9.70	0.20	5.80	8.07	3.21	0.87
46	6.29	5.51	23.01	0.49	6.65	18.25	7.41	0.84
47	5.79	5.10	17.01	0.49	6.23	13.17	5.85	0.85
48	2.89	5.68	10.53	0.18	3.41	10.38	3.14	1.13
49	6.84	5.18	31.01	0.64	6.54	26.49	8.04	1.35
50	6.54	7.32	27.23	0.41	4.88	25.95	9.37	1.34
51	5.19	6.50	29.01	0.36	7.64	26.15	4.16	0.23
52	2.79	3.70	11.01	0.31	6.67	8.94	1.64	0.08

Tableau C. 4. Résultats des analyses chimiques en r %.

C.7.3 Carte des faciès

Le tableau C.5 représente les différents faciès caractéristiques de l'ensemble des eaux rencontrés dans la zone d'étude. Cette classification recoupe les classifications de type graphique et nous a permis de représenter la répartition spatiale des faciès (Figure C.24).

Point d'eau	Formules caractéristiques	Faciès chimique
1	rCl- > rSO4-- > rHCO3-> rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Chlorurée Sodique
2	rSO4-- > rHCO3-> rCl- > rNO3- rNa+ > rK+ > rCa++ > rMg++	Sulfatée Sodique
3	rCl- > rSO4-- > rHCO3-> rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Chlorurée Sodique
4	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Chlorurée Sodique
5	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
6	rHCO3-> rSO4-- > rCl- > rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Bicarbonatée Sodique
7	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Chlorurée Sodique
8	rCl- > rSO4-- > rHCO3-> rNO3- rNa+ > rMg++ > rCa++ > rK+	Chlorurée Sodique
9	rHCO3-> rSO4-- > rCl- > rNO3- rMg++ > rNa+ > rCa++ > rK+	Bicarbonatée Magnésienne
10	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
11	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
12	rCl- > rSO4-- > rHCO3-> rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
13	rHCO3-> rSO4-- > rCl- > rNO3- rCa++ > rMg++ > rNa+ > rK+	Bicarbonatée Calcique
14	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
15	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
16	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
17	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rCa++ > rMg++ > rNa+ > rK+	Chlorurée Sodique
18	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
19	rHCO3-> rCl-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Bicarbonatée Sodique
20	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
21	rCl- > rSO4-- > rHCO3-> rNO3- rCa++ > rNa+ > rMg++ > rK+	Chlorurée Calcique
22	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
23	rHCO3-> rCl-> rSO4-- > rNO3- rCa++ > rNa+ > rMg++ > rK+	Bicarbonatée Calcique
24	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rCa++ > rNa+ > rMg++ > rK+	Chlorurée Calcique
25	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3- rNa+ > rCa++ > rMg++ > rK+	Chlorurée Sodique
26	rCl-> rHCO3-> rSO4-- > rNO3-	Chlorurée Sodique

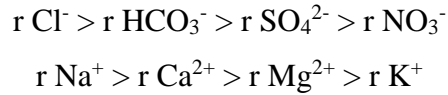
	$rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	
27	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
28	$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++} > rK^+$	Bicarbonatée Calcique
29	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
30	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
31	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
32	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
33	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
34	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
35	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
36	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
37	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
38	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
39	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
40	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
41	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
42	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
43	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
44	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
45	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
46	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
47	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
48	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
49	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
50	$rCl^- > rSO_4^{--} > rHCO_3^- > rNO_3^-$ $rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
51	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique
52	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{--} > rNO_3^-$ $rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{++} > rK^+$	Chlorurée Sodique

Tableau C. 5. Formules caractéristiques et faciès chimiques de l'eau.

Les faciès rencontrés dans la zone d'étude sont:

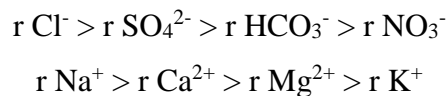
a) Faciès chloruré sodique

Ces eaux représentent, sur les 52 prélèvements, 83% des échantillons. Leur formule caractéristique est :



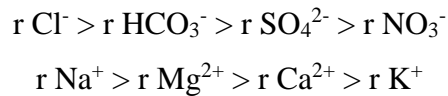
Elles sont caractérisées par une prédominance des bicarbonates sur les sulfates et le calcium sur le magnésium, sauf pour les cas suivant:

Le cas des échantillons 12, 29, 32, 36, 42, 46 et 49 où on note l'existence d'un premier sous faciès représenté par la formule caractéristique suivante :



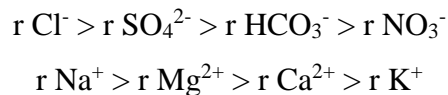
Ce sous faciès est caractérisé cette fois par une prédominance des sulfates sur les bicarbonates et le calcium sur le magnésium.

Le cas des échantillons 4, 7,48, 51 et 52 où on note l'existence d'un deuxième sous faciès représenté par la formule caractéristique suivante :



Ce sous faciès est caractérisé cette fois par une prédominance des bicarbonates sur les sulfates et le magnésium sur le calcium.

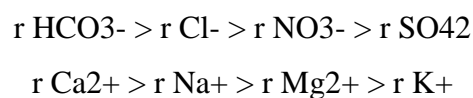
Le cas des échantillons 1, 3, 8 et 50 où on note l'existence d'un troisième sous faciès représenté par la formule caractéristique suivante :



Ce sous faciès est caractérisé cette fois par une prédominance des sulfates sur les bicarbonates et le magnésium sur le calcium.

b) Faciès bicarbonaté calcique

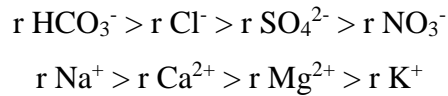
Ce faciès est représenté par les points d'eau 13, 28, 23, sa formule caractéristique chimique est la suivante :



Avec cependant une prédominance des chlorures sur les nitrates et le sodium sur le magnésium.

c) Faciès bicarbonaté sodique

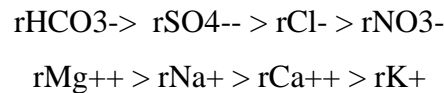
Ces eaux correspondent à la formule caractéristique suivante :



Les échantillons correspondant à ce faciès sont les points 6 et 19. Ils sont caractérisés par une prédominance des chlorures sur les sulfates et le calcium sur le magnésium.

d) Faciès bicarbonaté magnésien

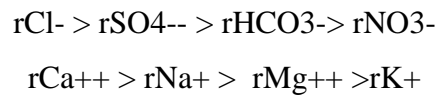
Sa formule caractéristique est :



Ce faciès a été rencontré au point d'eau n°9. Il est caractérisé par une prédominance des sulfates sur les chlorures et le sodium sur le calcium.

e) Faciès chloruré calcique

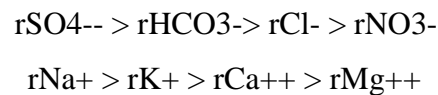
Représenté par les échantillons 21 et 24. Ce faciès est caractérisé par la formule suivante:



La prédominance des sulfates sur les bicarbonates et celle du sodium sur le magnésium caractérise ce faciès.

f) Faciès sulfaté sodique

Représenté par un seul point d'eau n° 2. Sa formule caractéristique est :



On note une prédominance des bicarbonates sur les chlorures et le sodium sur le calcium.

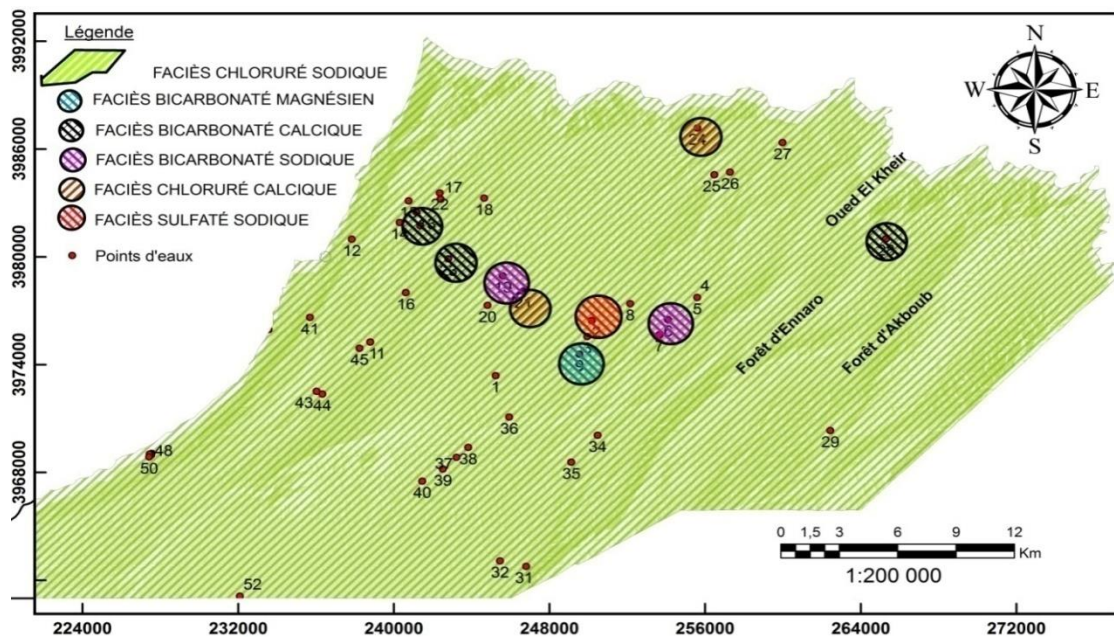


Figure C. 24. Carte des faciès chimiques sur le plateau de Mostaganem.

C.7.4 Interprétation

Presque la totalité des points d'eaux prélevés sur le plateau de Mostaganem, soit 43 points sur 52 (83%) sont chlorurés sodiques. Les cinq (05) autres familles restantes représentent 17% de l'ensemble de nos échantillons, répartis sur des points isolés.

Ce qui permet de conclure que d'une façon générale, l'eau souterraine du plateau de Mostaganem est Chlorurée sodique.

C.8 Qualité de l'eau

C.8.1 Potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine

Des normes ont été définies par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) définissant les paramètres physico-chimiques qui caractérise une eau salubre et propre destinée à la consommation humaine. Les teneurs acceptables indiquées dans le tableau C.6 définissent une eau généralement acceptable par le consommateur. Par contre, les teneurs admissibles représentent les limites, à partir desquelles la potabilité de l'eau est nettement diminuée.

Eléments	Teneurs acceptables (mg/l)	Teneurs admissibles (mg/l)
Ca ²⁺	75	200
Mg ²⁺	50	120
SO ₄ ²⁻	200	400
Cl-	200	600
NO ₃ ⁻	/	50
pH	7 < pH < 8.5	6.7 < pH < 9.2
Résidu sec	500	1500

Tableau C. 6. Normes de potabilité de l'eau (Source: O.M.S)

D'après les résultats des analyses physico-chimiques des points d'eau, la concentration en mg/l de l'ensemble des éléments chimiques (tableau E.1 de l'annexe E) est généralement en dessous des teneurs admissibles exigée par l'O.M.S.

La concentration des éléments chimiques dépassant les teneurs admissibles, pour notre zone d'étude, sont représentés par le Calcium (Ca) avec 7,69% de l'ensemble de nos points d'eaux (notamment les points d'eaux: 39, 27, 17, 15). Le Magnésium (Mg) avec environ 2 % au point 17. Pour les résidus sec on a enregistré un pourcentage de 36,54% aux points (3, 17, 20, 22, 28, 32, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 47, 49, 50, 51). Les Sulfates (SO₄) avec 7,69 % des points d'eaux (3, 27, 29, 50) et le Chlore (Cl) avec 28,85% des points d'eaux (3, 15, 27, 29, 37, 38, 39, 40, 40, 42, 44, 46, 49, 50, 51). Par contre, pour les nitrates on enregistre un taux plus important égal à la moitié des prélèvements (50 %). Le point d'eau n°15 (F Douar Henni à Sayada) donne

une concentration de 216 mg/l en nitrate, représentant ainsi un danger non négligeable du point de vue santé humaine (figure C.25).

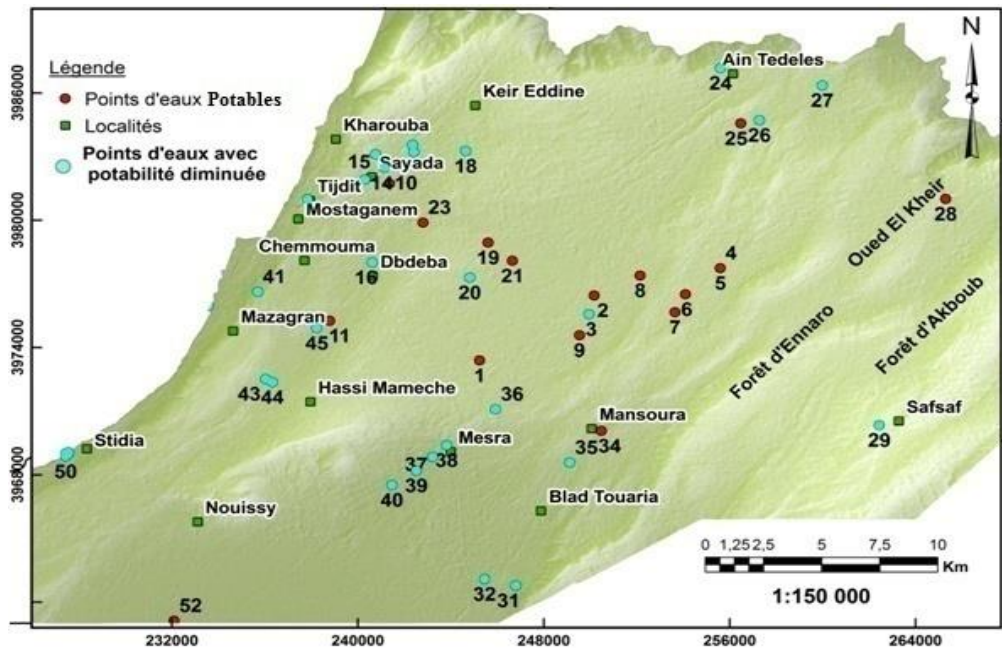


Figure C. 25. Carte des points dont la potabilité est nettement diminuée

C.8.2 Qualité de l'eau destinée à l'irrigation

Les normes de la qualité chimique de l'eau destinée à l'irrigation tiennent compte de la nature des cultures, du type du sol, du climat, de la méthode d'irrigation et des caractéristiques chimiques de l'eau. Cette dernière est très importante et peut augmenter ou diminuer la fertilité du sol selon la quantité des sels minéraux qu'elle lui apporte.

Pour notre zone d'étude, nous avons procédé à un certain nombre de calcul afin de déterminer la qualité de l'eau et d'en juger de son utilisation ou non pour l'irrigation, en utilisant la classification établie par Ayers R.S. et al., (1985), comme illustrée dans le tableau C.7.

Nature du problème	Paramètres et unités	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modérée	Fort e
Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)	C.E ¹¹ (dS/m)	< 0.7	0.7 – 3	> 3
Toxicité de certains ions (affecte les cultures sensibles)				
▪ Sodium (Na)				
- Irrigation de surface	S.A.R ²² (meq/l)	< 3	3 – 9	> 9
- Irrigation par aspersion	(meq/l)	< 3	> 3	
▪ Chlorure (Cl)				
- Irrigation de surface	meq/l	< 4	4 – 10	> 10
- Irrigation par aspersion	meq/l	< 3	> 3	

Tableau C. 7. Restrictions des eaux d'irrigation d'après (Ayers R.S. et al. 1985)

¹ C.E signifie conductivité électrique: c'est une mesure de la salinité de l'eau, rapportée en deciSiemens par mètre à 25 ° (dS / m) ou en unités millimhos par centimètre (mmho / cm).

² S.A.R: signifie le taux d'absorption du sodium (Sodium Adsorption Ratio) qui décrit la quantité du sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium.

On devra tenir compte du taux d'absorption du sodium par la relation suivante :

$$S.A.R = Na/\sqrt{(Ca + Mg)/2} \quad (C.4)$$

D'après les directives de la F.A.O (Food and Agriculture Organization) et la classification faite par les auteurs (Ayers R.S. et al. 1985), les calculs nécessaires pour identifier la qualité des eaux destinées à l'irrigation de la zone d'étude, sont présentés au tableau C.8.

Avec : A.R. : Aucune Restriction.

R.L.M. : Restriction Légère à Modérée.

F.R. : Forte Restriction.

N°du point d'eau	C.E (dS/m)	S.A.R (Még/l)	Cl (Még/l)	Toxicité (Cl)		Toxicité (Na)		Salinité (CE)
				Irrigation De surface	Irrigation par aspersion	Irrigation de surface	Irrigation par aspersion	
1	0,02	7,6	11,5	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
2	0,01	2,3	2,4	A.R.	A.R.	A.R.	A.R.	AR
3	0,03	7,3	18,6	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
4	0,01	9,8	6,1	R.L.M.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.	AR
5	0,01	4,4	5,3	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
6	0,01	2,3	1,3	A.R.	A.R.	R.L.M.	A.R.	AR
7	0,02	8,7	5,1	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
8	0,01	5,8	4,5	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
9	0,01	1,4	1,6	A.R.	A.R.	A.R.	A.R.	AR
10	0,01	2,4	3,2	A.R.	R.L.M.	A.R.	A.R.	AR
11	0,02	6,0	7,8	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
12	1,55	6,1	8,4	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
13	0,01	0,5	1,5	A.R.	A.R.	A.R.	A.R.	AR
14	2,00	6,5	6,8	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
15	2,73	3,5	17,3	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
16	1,84	3,7	8,1	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
17	0,03	2,8	12,9	F.R.	R.L.M.	A.R.	A.R.	AR
18	1,59	3,5	6,7	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
19	0,01	3,6	5,7	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
20	0,03	10,7	15,8	F.R.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.	AR
21	1,67	3,7	9,0	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
22	0,03	5,6	15,4	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
23	1,40	1,7	4,9	R.L.M.	R.L.M.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
24	0,01	2,5	6,0	R.L.M.	R.L.M.	A.R.	A.R.	AR
25	0,01	6,4	4,4	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
26	0,01	8,3	5,7	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
27	0,04	6,5	20,5	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
28	1,01	2,4	4,8	R.L.M.	R.L.M.	A.R.	A.R.	R.L.M.
29	3,18	11,5	22,5	F.R.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.	FR
30	1,77	8,7	7,1	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
31	1,50	5,0	7,5	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
32	0,02	7,6	11,8	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
33	0,02	3,6	7,9	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
34	0,02	2,2	9,0	R.L.M.	R.L.M.	A.R.	A.R.	AR
35	0,02	4,9	7,9	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
36	3,22	5,9	16,6	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	FR
37	0,03	5,4	20,7	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
38	2,70	6,9	17,4	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
39	3,18	8,1	26,3	F.R.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	FR

40	0,03	4,3	18,3	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
41	0,02	4,6	15,8	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
42	0,03	6,5	19,9	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
43	0,02	5,0	10,9	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
44	0,03	5,9	30,8	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
45	0,02	5,0	8,1	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
46	2,84	9,5	18,3	F.R	R.L.M.	F.R	R.L.M.	AR
47	2,34	7,3	13,2	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
48	0,02	5,1	10,4	F.R	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR
49	3,87	12,6	26,5	F.R	R.L.M.	F.R	R.L.M.	FR
50	3,78	10,3	26,0	F.R	R.L.M.	F.R	R.L.M.	FR
51	3,22	12,0	26,2	F.R	R.L.M.	F.R	R.L.M.	FR
52	0,02	6,1	9	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	AR

Tableau C. 8. Restrictions des eaux d'irrigation dans le plateau de Mostaganem

C.8.2.1 Salinité

D'après les valeurs des conductivités électriques des échantillons prélevés sur la zone d'étude, les eaux analysées présentent toutes des valeurs comprises entre 0.01 et 3,87 dS/m. Elles présentent, cependant, soit aucune restriction ou une restriction légère à modérée pour l'irrigation., sauf au points 29, 36, 39, 49, 50, 51 où une forte restriction est enregistrée (voir figure C.26).

C.8.2.2 Toxicité due au Sodium

Aucune restriction pour l'irrigation par aspersion n'est signalée pour les 100 % des points d'eaux de notre région. Pour l'irrigation de surface seulement 13,46% des points d'eau enregistre une forte restriction (voir figure C.27).

C.8.2.3 Toxicité due au Chlorure

Pour l'irrigation de surface les points d'eau 50, 51, 49, 46, 47, 48, 36, 44, 1, 37, 39, 40, 29, 27, 3, 15, 17 et 38 soit 44 % de la totalité de nos échantillons sont caractérisés par des eaux très chlorurées et donc une forte restriction pour l'irrigation de surface. Le reste des échantillons présentent aucune restriction ou une restriction légère à modérée.

Quand à l'irrigation par aspersion, la totalité des points d'eau présente aucune restriction ou une restriction légère à modérée (figure C.28).

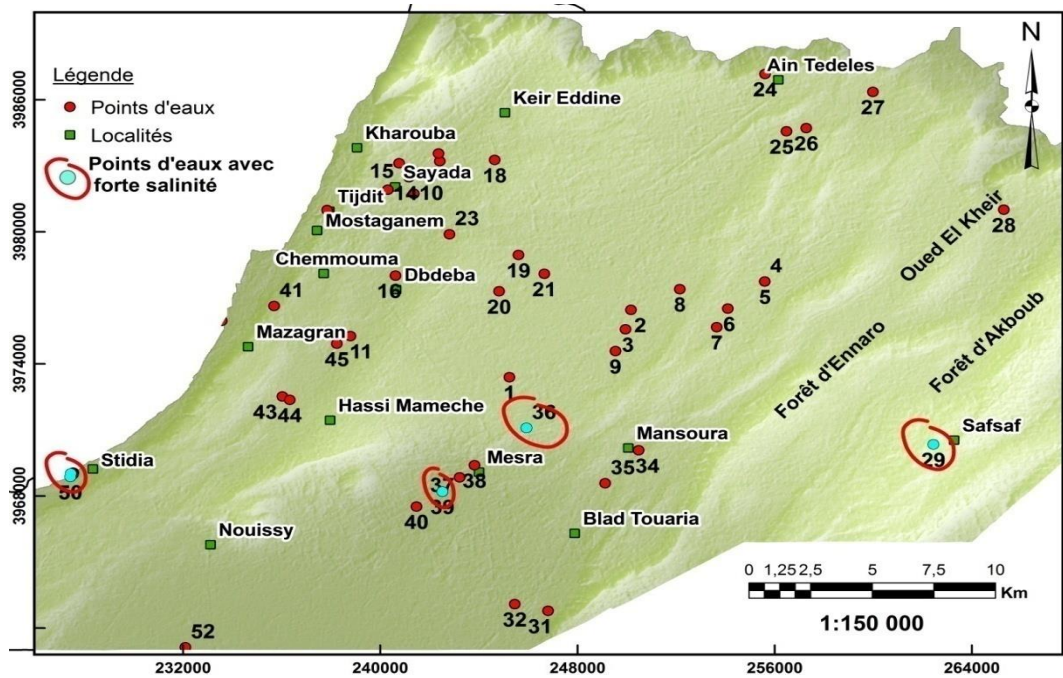


Figure C. 26. Carte des points d'eau à forte salinité

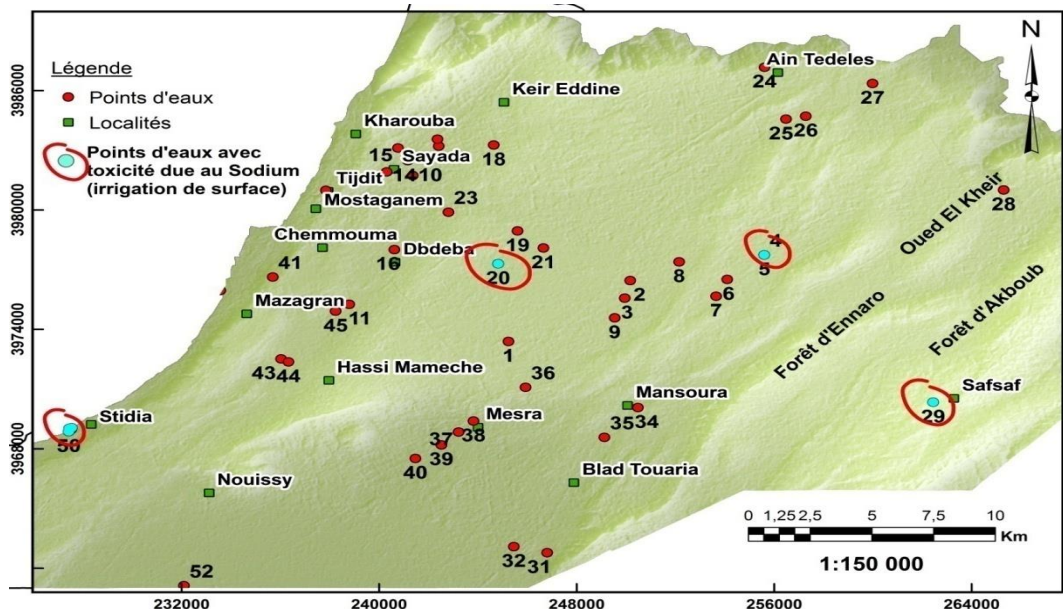


Figure C. 27. Carte des points d'eau à forte restriction pour l'irrigation de surface due à la toxicité au sodium

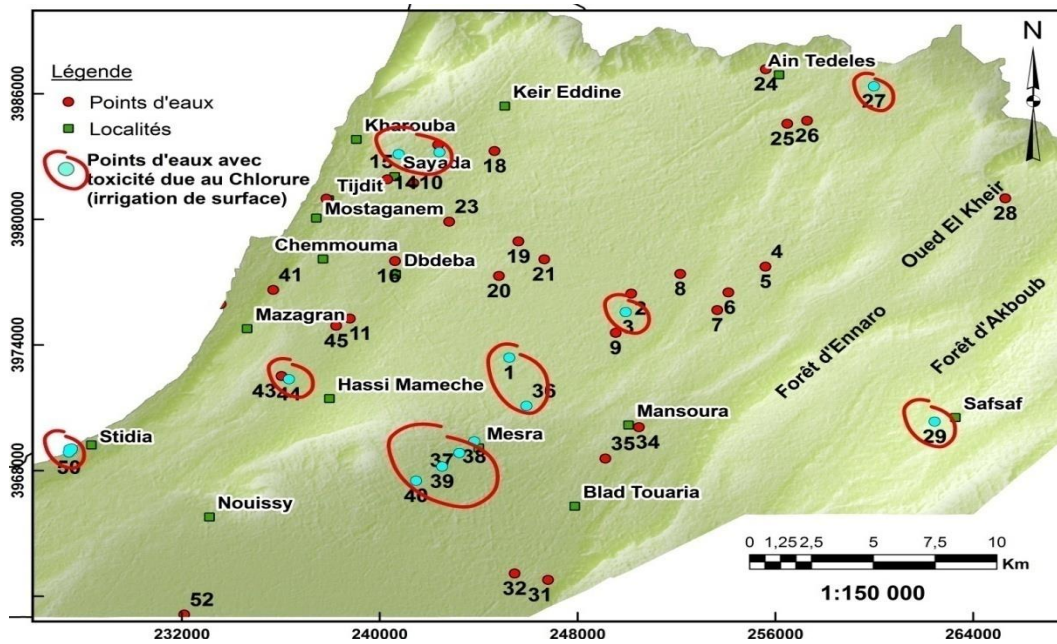


Figure C. 28. Carte des points d'eau à forte restriction pour l'irrigation de surface due à la toxicité au chlorure.

C.9 Conclusion

Les résultats des analyses chimiques des points d'eau prélevés dans notre secteur ont permis de dresser plusieurs cartes donnant la répartition spatiale des éléments chimiques majeurs et leurs évolutions à travers toute la région d'étude. En plus de la composition chimique des eaux de la région, ces cartes renseignent et confirment le sens de l'écoulement de la nappe.

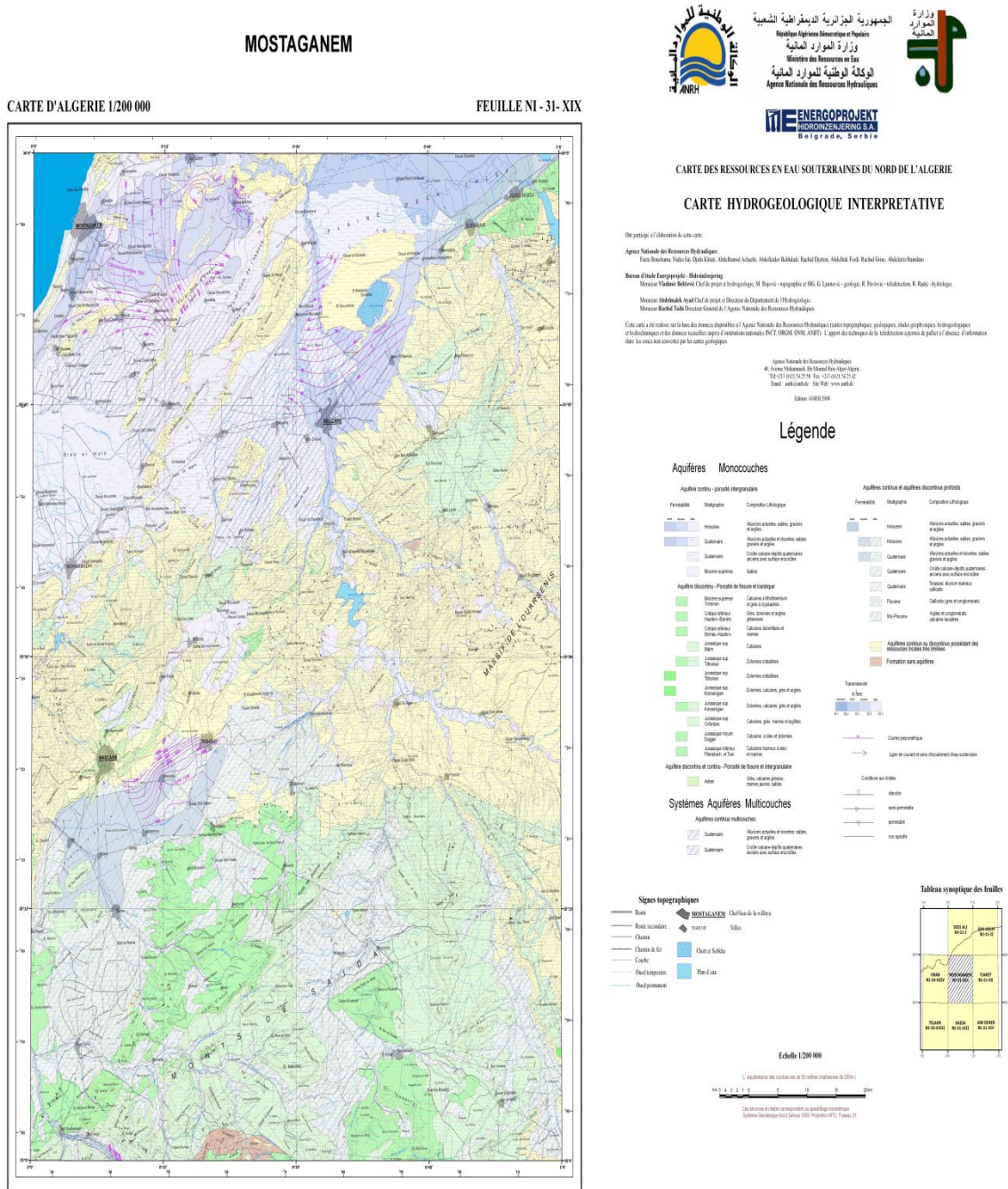
Dans la région d'étude, le faciès chimique des eaux le plus dominant est le faciès Chloruré Sodique. Les eaux de notre secteur sont caractérisées par une minéralisation moyennement élevée (allant de 310 à 2937 mg/l). Les forages situés à l'Ouest et au Sud du plateau comprennent des eaux à caractères plus ou moins potable. L'eau du forage n°15 (F Douar Henni- Sayada-) renferme une grande valeur de Nitrates ce qui rend cette eau impropre à la consommation humaine.

L'étude de la qualité des eaux d'irrigation selon la classification de la F.A.O a montré que ces eaux présentent en générale soit aucune restriction ou une restriction légère à modérée pour l'irrigation par aspersion. Cependant, le sud du plateau enregistre des points d'eau à forte salinité. Les forages du Sud-ouest du plateau, notamment les forages situés à Stidia, représentent une toxicité au chlorure, une toxicité au sodium et une forte salinité, ce qui constitue une restriction à l'irrigation de surface dans cette localité.

Annexe D

Carte hydrogéologique interprétative

Figure D. 1. Carte hydrogéologique interprétative publiée par l'ANRH en 2008 à l'échelle: 1/200 000



Annexe E

Analyses chimiques des eaux

souterraines du plateau de Mostaganem

Points d'eaux	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	Cond	RS	Min	PH
1	42	57	322	7	406	293	123	5	20	1500	1240	8.2
2	38	17	69	106	86	240	202	4	9	800	558	8.1
3	128	85	432	16	660	420	171	4	30	1940	1860	7.1
4	20	24	274	3	215	134	285	2	14	920	868	8.3
5	56	23	154	3	188	77	219	2	11	720	682	8
6	28	26	71	2	46	84	247	3	5	460	310	8.1
7	14	48	306	6	182	14	160	1	17	1120	1054	8.9
8	20	27	168	2	158	161	126	3	10	780	620	8.1
9	28	33	46	2	56	103	135	3	5	380	310	8.2
10	78	25	94	2	112	96	275	39	9	860	558	7.5
11	80	42	267	6	277	163	337	45	17	1120	1054	8.1
12	110	30	281	27	296	291	298	60	1553	1380	1179	7.33
13	96	24	21	3	54	110	197	60	7	540	434	8
14	111	6	258	5	241	180	379	72	2000	1280	1240	7.8
15	282	65	251	4	614	224	286	216	2730	2080	2072	7.15
16	144	30	186	0.7	286	85	439	94	1840	1280	1141	7.4
17	451	237	299	23	457	4	473	32	32	4040	1984	7.9
18	118	23	161	2	236	96	352	67	1590	1180	986	7.6
19	100	32	161	5	202	82	350	8	13	880	806	8.2
20	106	34	497	8	559	252	436	56	29	1840	1798	8
21	176	22	196	4	320	238	253	12	1674	1300	1271	7.21
22	200	50	340	10	546	307	408	65	27	2020	1674	8
23	130	43	90	3	175	101	340	22	1400	880	868	8.1
24	156	44	138	4	214	187	285	95	14	1250	868	7.5
25	36	19	191	7	155	132	200	39	10	820	620	8.3
26	52	14	260	8	203	156	252	51	14	1020	868	8
27	291	117	518	29	726	888	400	26	43	3200	2666	7.9
28	100	31	108	4	170	86	330	42	1014	860	770	7.49
29	157	35	612	16	797	438	333	45	3180	2440	2414	7.19
30	41	22	278	4	253	156	270	72	1770	1100	1097	8.2
31	97	32	223	3	267	118	319	97	1500	1300	1139	7.18
32	90	45	354	15	416	264	295	51	24	1640	1488	7.9
33	130	29	173	5	279	67	308	84	15	1060	930	7.8
34	155	38	120	7	320	86	315	41	15	1160	930	7.8
35	108	17	207	8	279	144	301	100	18	1280	1116	8.1
36	161	72	360	7	589	360	360	85	3220	2140	1996	7.1
37	182	95	363	14	732	216	314	30	26	2060	1612	8.4
38	155	41	375	7	616	259	342	36	2700	2000	1857	7.2
39	248	11	483	8	931	159	278	24	3180	2700	2414	7.2
40	196	80	285	11	648	168	361	30	26	2020	1612	7.8
41	150	64	267	7	559	163	353	74	20	1540	1240	7.4
42	170	84	414	20	704	336	298	90	34	2160	2108	8
43	106	47	248	5	385	154	323	80	20	1400	1240	7.8
44	162	59	345	6	1092	96	267	44	32	2300	1984	8.4
45	100	31	223	8	286	154	354	54	16	1160	992	7.5
46	126	67	529	19	647	356	406	52	2840	1960	2156	7.27
47	116	62	391	19	467	281	380	53	2340	1680	1776	7.18
48	58	69	242	7	368	151	208	70	17	1120	1045	8.5
49	137	63	713	25	939	386	399	84	3870	2740	2937	7.31
50	131	89	626	16	920	450	298	83	3780	2780	2869	7.61
51	104	79	667	14	927	200	466	14	3220	2500	2444	7.18
52	56	45	253	12	317	79	407	5	15	1080	930	7.5

Tableau E. 1. Analyses chimiques des échantillons d'eaux souterraines (mg/l, source : ANRH 1993-2015)

N°	r Cl (meq/l)	r so4 (meq/l)	r HCO3 (meq/l)	r NO3 (meq/l)	rCa (meq/l)	rMg (meq/l)	rNa (meq/l)	r k (meq/l)	Σ r anions	Σ r cations	NICB (%)
1	11,45	6,10	2,02	0,08	2,10	4,69	14,00	0,18	19,65	20,97	3
2	2,43	5,00	3,31	0,06	1,90	1,40	3,00	2,71	10,80	9,01	-9
3	18,64	8,74	2,80	0,06	6,40	7,00	18,78	0,41	30,26	32,59	4
4	6,07	2,79	4,67	0,03	1,00	1,98	11,91	0,08	13,57	14,97	5
5	5,31	1,60	3,59	0,03	2,80	1,89	6,70	0,08	10,54	11,47	4
6	1,30	1,75	4,05	0,05	1,40	2,14	3,09	0,05	7,14	6,68	-3
7	5,14	0,29	2,62	0,02	0,70	3,95	13,30	0,15	8,07	18,11	38
8	4,46	3,35	2,07	0,05	1,00	2,22	7,30	0,05	9,93	10,58	3
9	1,58	2,14	2,21	0,05	1,40	2,72	2,00	0,05	5,99	6,17	1
10	3,16	2,00	4,51	0,63	3,90	2,06	4,09	0,05	10,30	10,10	-1
11	7,82	3,39	5,52	0,73	4,00	3,46	11,61	0,15	17,47	19,22	5
12	8,36	6,06	4,88	0,97	5,50	2,47	12,22	0,69	20,27	20,88	1
13	1,53	2,29	3,23	0,97	4,80	1,98	0,91	0,08	8,01	7,77	-2
14	6,81	3,75	6,21	1,16	5,55	0,49	11,22	0,13	17,93	17,39	-2
15	17,34	4,66	4,69	3,48	14,10	5,35	10,91	0,10	30,18	30,47	0
16	8,08	1,77	7,19	1,52	7,20	2,47	8,09	0,02	18,56	17,77	-2
17	12,91	0,08	7,75	0,52	22,55	19,51	13,00	0,59	21,26	55,64	45
18	6,67	2,00	5,77	1,08	5,90	1,89	7,00	0,05	15,51	14,84	-2
19	5,71	1,71	5,74	0,13	5,00	2,63	7,00	0,13	13,28	14,76	5
20	15,79	5,25	7,15	0,90	5,30	2,80	21,61	0,20	29,09	29,91	1
21	9,04	4,96	4,15	0,19	8,80	1,81	8,52	0,10	18,33	19,23	2
22	15,42	6,39	6,69	1,05	10,00	4,12	14,78	0,26	29,55	29,15	-1
23	4,94	2,10	5,57	0,35	6,50	3,54	3,91	0,08	12,97	14,03	4
24	6,05	3,89	4,67	1,53	7,80	3,62	6,00	0,10	16,14	17,52	4
25	4,38	2,75	3,28	0,63	1,80	1,56	8,30	0,18	11,03	11,85	4
26	5,73	3,25	4,13	0,82	2,60	1,15	11,30	0,20	13,93	15,26	5
27	20,51	18,49	6,56	0,42	14,55	9,63	22,52	0,74	45,97	47,44	2
28	4,80	1,79	5,41	0,68	5,00	2,55	4,70	0,10	12,68	12,35	-1
29	22,51	9,12	5,46	0,73	7,85	2,88	26,61	0,41	37,82	37,75	0
30	7,15	3,25	4,43	1,16	2,05	1,81	12,09	0,10	15,98	16,05	0
31	7,54	2,46	5,23	1,56	4,85	2,63	9,70	0,08	16,79	17,26	1
32	11,75	5,50	4,83	0,82	4,50	3,70	15,39	0,38	22,91	23,98	2
33	7,88	1,39	5,05	1,35	6,50	2,39	7,52	0,13	15,68	16,54	3
34	9,04	1,79	5,16	0,66	7,75	3,13	5,22	0,18	16,65	16,27	-1
35	7,88	3,00	4,93	1,61	5,40	1,40	9,00	0,20	17,43	16,00	-4
36	16,64	7,50	5,90	1,37	8,05	5,93	15,65	0,18	31,40	29,81	-3
37	20,68	4,50	5,15	0,48	9,10	7,82	15,78	0,36	30,81	33,06	4
38	17,40	5,39	5,61	0,58	7,75	3,37	16,30	0,18	28,98	27,61	-2
39	26,30	3,31	4,56	0,39	12,40	0,91	21,00	0,20	34,55	34,51	0
40	18,31	3,50	5,92	0,48	9,80	6,58	12,39	0,28	28,20	29,06	1
41	15,79	3,39	5,79	1,19	7,50	5,27	11,61	0,18	26,16	24,56	-3
42	19,89	7,00	4,88	1,45	8,50	6,91	18,00	0,51	33,22	33,93	1
43	10,88	3,21	5,29	1,29	5,30	3,87	10,78	0,13	20,67	20,08	-1
44	30,85	2,00	4,38	0,71	8,10	4,86	15,00	0,15	37,93	28,11	-15
45	8,08	3,21	5,80	0,87	5,00	2,55	9,70	0,20	17,96	17,45	-1
46	18,28	7,41	6,65	0,84	6,30	5,51	23,00	0,49	33,18	35,30	3
47	13,19	5,85	6,23	0,85	5,80	5,10	17,00	0,49	26,13	28,39	4
48	10,40	3,14	3,41	1,13	2,90	5,68	10,52	0,18	18,08	19,28	3
49	26,53	8,04	6,54	1,35	6,85	5,19	31,00	0,64	42,46	43,67	1
50	25,99	9,37	4,88	1,34	6,55	7,33	27,22	0,41	41,58	41,50	0
51	26,19	4,16	7,64	0,23	5,20	6,50	29,00	0,36	38,21	41,06	4
52	8,95	1,64	6,67	0,08	2,80	3,70	11,00	0,31	17,35	17,81	1

Tableau E. 2. Balances ioniques des échantillons d'eau en %

Annexe F

Cartes des contraintes liées à la proximité

Cartes des contraintes (plateau de Mostaganem)

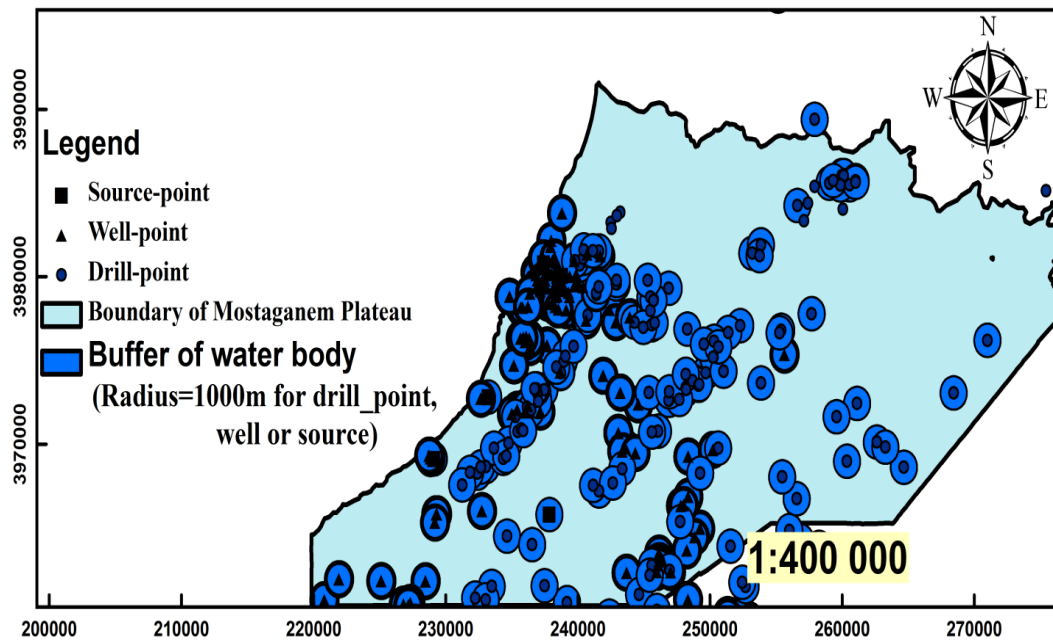


Figure F. 1. Carte de contrainte des cours d'eaux ponctuels

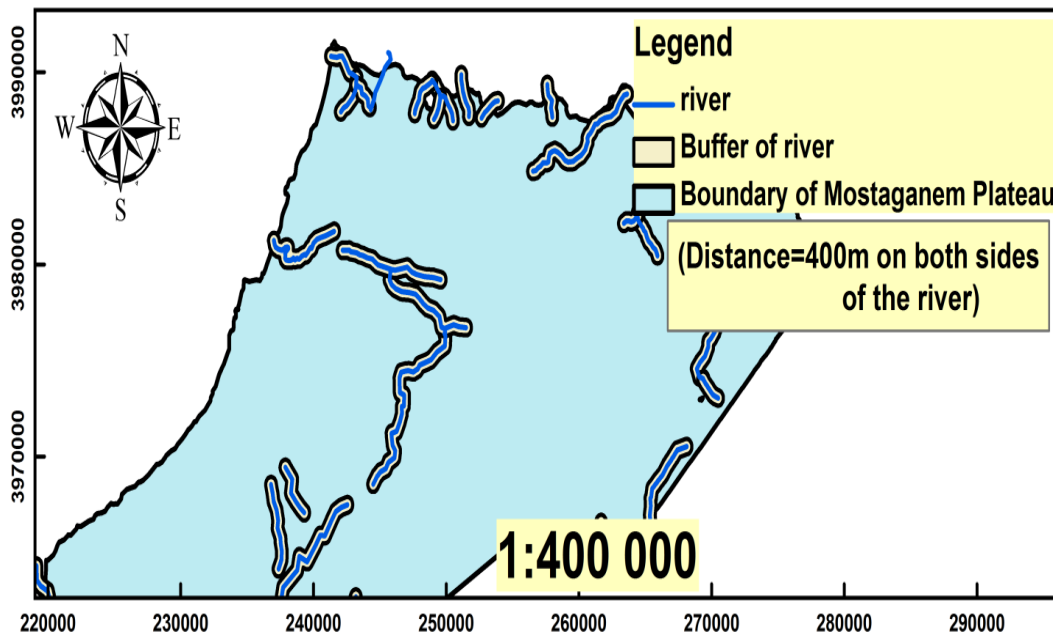


Figure F. 2. Carte de contrainte des cours d'eaux linéaires

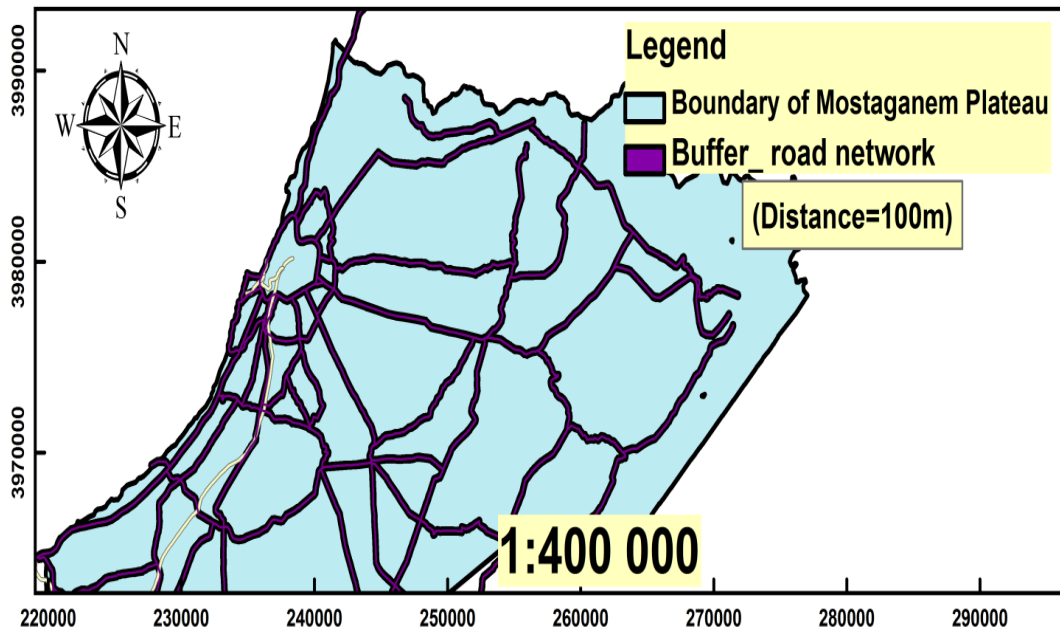


Figure F. 3. Carte de contrainte liée au réseau routier

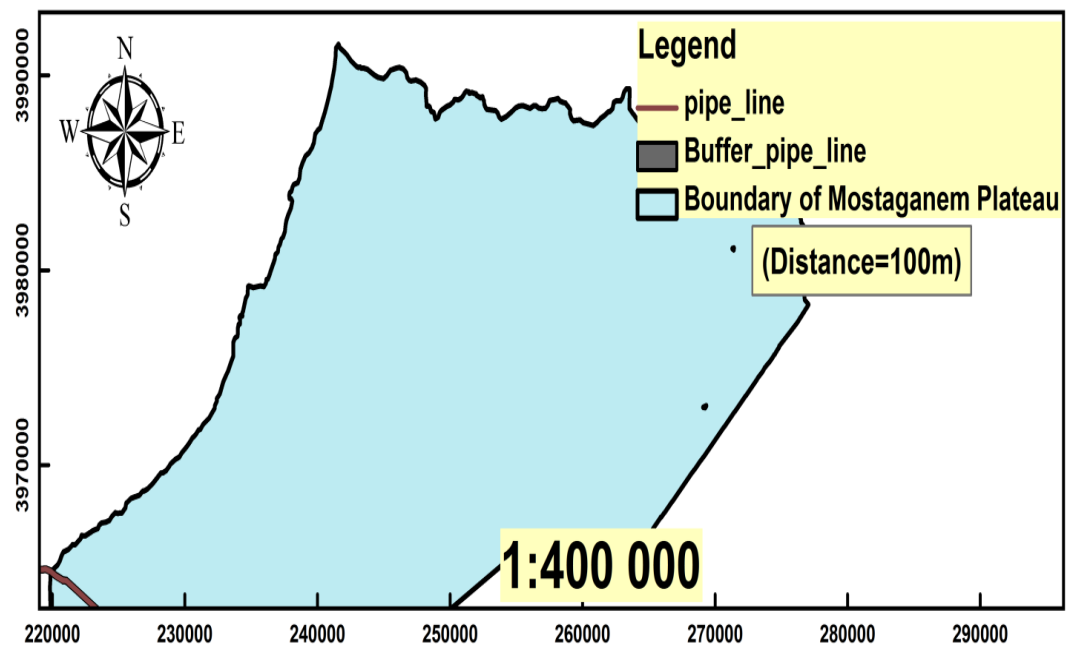


Figure F. 4. Carte de contrainte relative au pipe-line

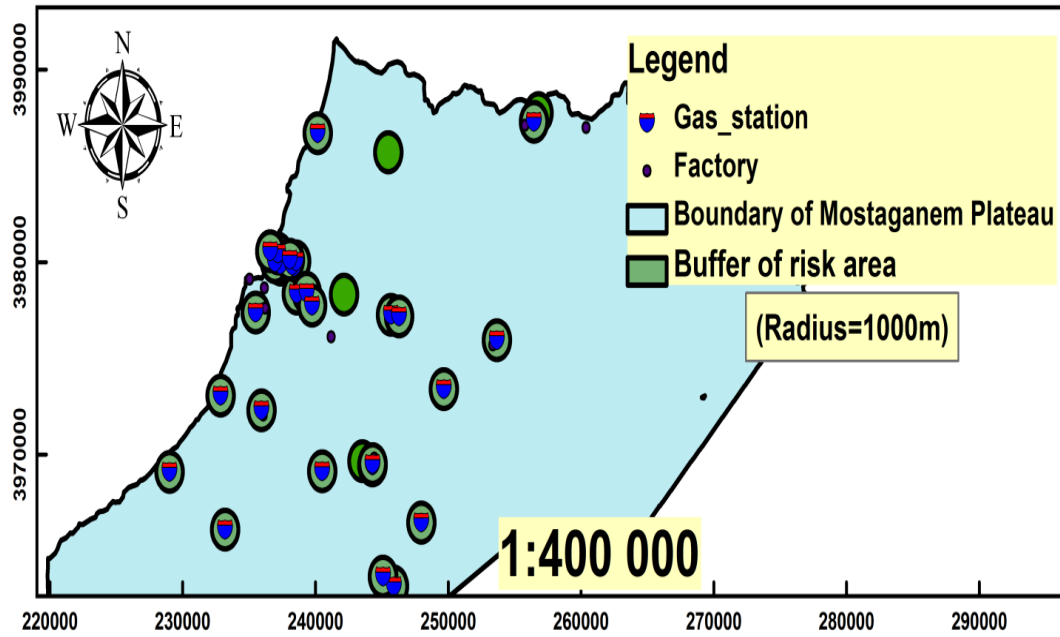


Figure F. 5. Carte de contrainte relative aux zone à risque (stations de service, usine,...).