

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : métiers de la ville

Spécialité : géomatique et gestion du foncier

Par : Hadid Mohammed Issam et Hocine Zakaria

Sujet

**Construction d'un système d'information géographique des
paramètres hydrodynamiques de la nappe du plateau de
Mostaganem.**

Soutenu publiquement, le 21 /06/2026, devant le jury composé de :

Mr TERKI HASSAIN T.A.
Mme SELKA I.
Mme BENZIAN I.F.

MCB
MAB
MAA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadrante

Année universitaire : 2025/2026

Remercîments :

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail de fin d'études.

Nous n'aurions pas pu mener à bien cette thèse sans le soutien et l'aide de nombreuses personnes, auxquelles nous tenons à exprimer notre sincère gratitude.

Nous adressons notre sincères remerciements à l'ensemble de personnel du département d'architecture du Faculté de Technologie de l'université ABOUBAKER BELKAID à Tlemcen pour leur soutien tout au long de notre formation, ainsi que pour leur présence constante au service des étudiants.

Nous tenons également à remercier la direction du Centre des techniques spatiales (CTS) pour nous avoir ouvert les portes du département de géomatique et de systèmes d'information spatiale et pour nous avoir recommandés, ainsi que pour nous avoir fourni les ressources nécessaires à la réalisation de ce projet.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur professionnel, **M. Dahni Abdul Latif**, pour son empressement à nous fournir toutes les données nécessaires pour notre travail, ses précieux conseils et son soutien tout au long de notre période de formation.

Nous tenons également à remercier notre encadrante, **Mme Benzian Imane Fazilet**, pour tous les efforts qu'elle a déployés pour nous, pour ces conseils précis et ses précieux avis scientifiques.

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude à monsieur Mr Terki Hassaine T.A , pour avoir honoré notre trail en acceptant de présider le jury de soutenance.

Nous remercions également les honorables membres du jury pour le temp qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail.

Dédicace :

Je dédie ce travail...

À mes précieux parents, mon Père **Hadid Mohammed** et ma mère **Mechai Nesrine**, pour leur inconditionnel amour, leurs sacrifices faites pour moi et leur soutien infini tout au long de ma vie. Je n'ai pas de mots pour exprimer ma profonde gratitude envers vous.

À ma future femme, **Hechchad Aya**, pour sa patience avec moi, pour soyez la pour moi, son amour et ses encouragements qui m'ont accompagné au long de ce parcours

À mes frères bien-aimés, **Hadid Imed Eddine**, **Hadid Ahmed Chahine** et **Hadid Amr Zizou**, pour leur présence, leur soutien et les beaux souvenirs que nous avons partagés.

À tous ma famille, grands et petits pour leur amour et leurs prières qui m'ont toujours soutenu.

À mon frère, ami, partenaire et mon binôme, **Hocine Zakaria**, pour sa collaboration, sa bonne humeur et toutes les efforts partagés tout au long de notre formation.

À tous mes chers amis que j'aurais pu oublier de mentionner, je dédie ce travail.

Issam

Dédicace :

Louange à ALLAH ; notre grand seigneur, de nous avoir éclair le chemin du savoir et de nous avoir donnée la bonne volonté et la patience. Par ta grâce les souhaits et les difficultés se surmontent. Aujourd'hui, je me tiens au seuil d'une réussite longtemps espérée, et je te remercie pour ce bienfait.

A mes chers parents

Je vous dédie les fruits de ce travail, avec tout le respect et la profonde gratitude que vous m'avez témoignés pour votre amour, vos sacrifices et votre patience inébranlable. Ce que j'ai accompli aujourd'hui n'est que le reflet de vos conseils, de vos prières et de votre foi inébranlable en moi.

A mon cher père, **Abdelhakim**

A toi qui m'a appris que la dignité réside dans le travail, et que la réussite n'est accessible qu'à travers la patience et la persévérance. Merci pour chaque fatigue cachée derrière un sourire, vous êtes toujours été mon exemple et mon refuge dans les moments difficiles. Que dieu vous garde longtemps auprès de nous.

A ma chère maman **Sacia**

A toi la plus belle bénédiction de ma vie, la source inépuisable de tendresse et d'amour. Merci d'avoir été le cœur qui m'abrite et la prière qui m'accompagne et la main qui me relève à chaque chute.

Aucun mot ne saurait exprimer la place que tu t'occupes dans mon cœur. Vous êtes ma paix, ma force et mon plus précieux trésor.

A mes chères sœurs **Asma et Chaima**

Votre existence dans ma vie une grâce immense. Je vous souhaite un avenir rempli de bonheur, de réussite et de sérénité.

A mes chers frères **Yahia et Aïssa**

Que dieu vous accorde le succès, le bonheur et tout le bien que vous méritiez.

A mon amie **Aïssam**

N'oublie jamais à quel point ta présence compte pour moi. Les moments passés ensemble sont précieux et m'apportent beaucoup de joie. Merci d'être là dans les bons comme dans les mauvais moments. Merci encore pour ta présence et ta belle amitié.

A mes honorables **enseignantes**

A ceux qui ont porté la noble mission du savoir, merci pour chaque conseil, chaque effort consacré à notre réussite.

Hocine. Zakaria

Résumé :

La nappe du Plateau de Mostaganem constitue la principale ressource naturelle en eau de la région. Cependant, elle fait face aujourd'hui à une exploitation anarchique provoquée par une mauvaise gestion, ce qui est une situation critique qui entraîne la dégradation progressive de la qualité de ses eaux.

Face à cette problématique, il devient indispensable d'agir ; c'est pourquoi ce travail se donne pour objectif de concevoir un outil d'aide à la décision capable de garantir une gestion à la fois rationnelle et durable de cette ressource vitale. Pour ce faire, la démarche de construction d'un Système d'Information Géographique (SIG) appliqué aux paramètres hydrodynamiques de la nappe a été détaillé dans cette étude à travers le traitement des cartes en question.

Mots clés : SIG, nappe du Plateau de Mostaganem, géoréférencement, numérisation, interpolation spatiale, RBF Multiquadratique, télédétection.

ملخص

يُعدّ خزان المياه الجوفية في هضبة مستغانم المصدر الرئيسي للمياه الطبيعية في المنطقة. إلا أنه يواجه حاليًا استغلالًا غير مُنظّم نتيجة لسوء الإدارة، وهو وضع حرج يُؤدي إلى تدهور تدريجي في جودة مياهه. في مواجهة هذه المشكلة، يُعدّ اتخاذ إجراءات عاجلة أمرًا ضروريًا؛ لذا، يهدف هذا العمل إلى تصميم أداة لدعم اتخاذ القرارات قادرة على ضمان إدارة رشيدة ومستدامة لهذا المورد الحيوي. مُطبّق على المعايير الهيدروديناميكية لخزان المياه الجوفية (GIS) ولتحقيق هذه الغاية، تمّ تفصيل عملية بناء نظام معلومات جغرافية. في هذه الدراسة من خلال معالجة الخرائط ذات الصلة

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، خزان المياه الجوفية في هضبة مستغانم، الإسناد الجغرافي، الرقمنة، الاستيفاء المكاني، دالة الأساس الشعاعي متعددة الترتيبات، الاستشعار عن بُعد.

Abstarct :

The Mostaganem Plateau aquifer is the region's main natural water resource. _However, it is currently facing uncontrolled exploitation due to poor management, a critical situation that is leading to the progressive degradation of its water quality. Faced with this problem, action is essential; therefore, this work aims to design a decision-support tool capable of ensuring both rational and sustainable management of this vital resource. To this end, the process of constructing a Geographic Information System (GIS) applied to the aquifer's hydrodynamic parameters was detailed in this study through the processing of the relevant maps.

Keywords: GIS, Mostaganem Plateau aquifer, georeferencing, digitization, spatial interpolation, Multiquadrate RBF, remote sensing.

Tableau des matières :

Introduction Générale :.....	15
Chapitre 1 :	16
Localisation de la zone d'étude	16
I. Introduction :	17
II. Localisation géographique	17
II.1 Relief et topographie	18
II.2 Géologie régionale :	20
II.3 Climatologie :	21
II.4 Hydrographie :	21
II.5 Hydrogéologie :	22
III. L'étalement :	23
IV. Source de données :	27
IV.1 Ces points forts :	27
IV.2 Ces points faibles :	28
V. Conclusion :	28
Chapitre 2 :	29
Le Géoréférencement.	29
I. Introduction :	30
II. Cadre théorique :	30
II.1 Définition de géoréférencement :	31
II.2 Géoréférencement et système de projection :	32
II.2.1 Géoréférencement de cartes non basées sur un réseau géodésique :	33
II.2.2 Géoréférencement de cartes basées sur un réseau géodésique :	33
II.3 L'importance du géoréférencement :	34
II.4 Méthodes de géoréférencement :	35
II.4.1 Géoréférencement absolu :	35
II.4.2 Géoréférencement relatif :	36
II.4.3 Géoréférencement par Google Earth :	37
II.5 Logiciels utilisés :	38
II.5.1 MapInfo :	38
II.5.2 Globale Mapper :	39

II.6	Les transformations proposées par les logiciels SIG :	40
II.7	Les points d'appuis :	40
III.	Cadre pratique :	41
III.1	Les méthodes de géoréférencement utilisée :	41
III.2	Description de document de référence :	42
III.3	Application de la méthode de géoréférencement relatif :	42
III.3.1	Logiciel utilisé :	42
III.3.2	Choix du système de projection :	42
III.3.3	Le choix de transformation :	45
III.3.4	Choix des points d'appui :	46
III.4	Discussion des résultats du géoréférencement :	47
IV.	Conclusion :	48
	Chapitre 3 :	49
	Outils et Méthodes :	49
I.	Introduction :	50
II.	Définitions :	50
II.1	Système d'information géographique « SIG » :	50
II.2	L'information géographique :	51
II.2.1	Les données géographiques :	51
II.2.2	La donnée « raster » :	51
II.2.3	La donnée « vecteur » :	52
II.2.4	La donnée alphanumérique :	52
III.	Base de données :	53
III.1	Présentation de logiciel ArcGIS :	54
III.2	Fonctionnalité de logiciel ArcGIS :	54
.IVCas	d'étude :	55
IV.1	Les composantes de la base de données :	57
IV.1.1	Points d'eau :	57
IV.1.2	Réseau hydrologique :	58
IV.1.3	Paramètre hydrodynamique :	59
IV.1.4	Paramètre de stockage :	60
IV.1.5	Paramètre hydrochimiques :	61
VI.	Conclusion :	62

Chapitre 4 :	63
Résultats et Interprétations.	63
I. Introduction :	64
II. L'interpolation :	64
II.1 Définition de fonction de base radiale (RBF) :	64
II.2 Types de fonctions de base radiale :	64
II.3 Utilisation des fonctions de base radiale :	64
II.4 Avantage fonctions de base radiale :	65
II.5 Défis et limite des fonctions à base radiale :	65
III. Cas d'étude :	65
III.1 Justification de choix de la fonction de base radiale (RBF) :	65
III.2 Choix de type de la RBF :	65
III.3 Exécution de la RBF sur ArcGIS :	65
III.4 Discussion des résultats d'interpolation fonction de base radiale :	66
III.4.1 Erreur moyenne (ME) :	66
III.4.2 Erreur absolue moyenne (MAE) :	66
III.4.3 L'erreur quadratique moyenne (RMSE) :	66
III.4.4 La droite de régression (R^2) :	66
IV. Les résultats de l'interpolation :	67
IV.1 La carte d'étiage :	67
IV.2 Carte hautes eaux :	69
IV.3 Carte isobathe :	71
IV.4 Carte isopièze :	73
IV.5 Carte toit substratum :	75
IV.6 Carte de gradient hydraulique :	77
IV.7 Carte de transmissivité :	79
V. Conclusion :	80
Conclusion Générale :	82
Bibliographie :	83
Webographie :	85
Annexes :	87

Liste des Figures :

Chapitre 1 :

Figure 1- 1 : Carte de localisation du plateau de Mostaganem (ArcGIS).	17
Figure 1- 2 : Relief du Plateau (Google Earth).	18
Figure 1- 3 : Limite de la nappe du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).	18
Figure 1- 4 : Carte topographique du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).	19
Figure 1- 5 : Carte géologique de la wilaya de Mostaganem.	20
Figure 1- 6 : Carte des bassins versants et cours d'eau du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).	21
Figure 1- 7 : Carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem UTM 31(DEMRH 1974) (modifié).	22
Figure 1- 8 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 1985, (Landsat5).	23
Figure 1- 9 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 2013, (Landsat9).	24
Figure 1- 10 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 2024, (Landsat9).	25
Figure 1- 11 : Carte des hautes eaux (GAUCHEZ 1970).	27

Chapitre 2

Figure 2- 1 : Traitement de scanner.	30
Figure 2- 2 : Scanner utilisé.	30
Figure 2- 3 : Organigramme de l'identification de l'information géographique.	31
Figure 2- 4 : Organigramme de la relation entre le géoréférencement et le système de références.	34
Figure 2- 5 : Carroyage avec amorce de coordonnées.	36
Figure 2- 6 : Géoréférencement relatif.	37
Figure 2- 7 : Coordonnées du détail recherché.	38
Figure 2- 8 : Carte hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (DEMRH 1974).	42
Figure 2- 9 : Superposition de deux couches avec différents systèmes de projection.	44
Figure 2- 10 : Superposition de deux couches avec le même système projection.	44
Figure 2- 11 : Paramètres de transformation affine.	45
Figure 2- 12 : Répartition de points de calage sur les quatre coins.	46
Figure 2- 13: Distorsion de la carte après géoréférencement.	47
Figure 2- 14 : Valeur de RMS de la carte hydrogéologique.	47
Figure 2- 15 : Valeur de RMS carte du toit du substratum.	48

Chapitre 3

Figure 3- 1: Les composantes d'un système d'information géographique SIG.	50
Figure 3- 2 : La superposition des couches thématiques, (Image ESRI).	51
Figure 3- 3 : Organigramme de traitement des données dans un SIG.	52
Figure 3- 4 : Accessibilité pour ArcGIS.	54
Figure 3- 5 : Résultat de numérisation carte isopiète (ArcGIS).	56
Figure 3- 6 : Résultats de numérisation des points d'eau (ArcGIS).	57
Figure 3- 7 : Résultats de la numérisation des Cours d'eau (ArcGIS).	58
Figure 3- 8 : Résultat de la numérisation des courbes isopiètes (ArcGIS).	59

Figure 3- 9 : Résultats de la numérisation du toit du substratum (ArcGIS).....	60
Figure 3- 10 : Résultats de la numérisation de la carte isoconnes NO2 (ArcGIS).....	61

Chapitre 4

Figure 4- 1 : Interpolation par fonction de base radiale carte d'étiage (ArcGIS).	67
Figure 4- 2 : Graphiques de la cross validation de la carte étiage.	68
Figure 4- 3 : Interpolation fonction de base radiale carte hautes eaux (ArcGIS).....	69
Figure 4- 4 : Graphiques de la cross validation de la carte hautes eaux.	70
Figure 4- 5 : Interpolation de base radiale carte isobathe (ArcGIS).	71
Figure 4- 6 : Graphiques de la cross validation de la carte isobathe.	72
Figure 4- 7 : Interpolation de base radiale carte isopieze (ArcGIS).....	73
Figure 4- 8 : Graphiques de la cross validation de la carte isopieze.	74
Figure 4- 9 : Graphiques de la cross validation de la carte toit substratum (ArcGIS).	75
Figure 4- 10 : Graphiques de la cross validation de la carte du toit du substratum.	76
Figure 4- 11 : Interpolation de base radiale carte gradient hydraulique (ArcGIS).....	77
Figure 4- 12: Graphiques de la cross validation de la carte du gradient hydraulique.	78
Figure 4- 13 : Interpolation de base radiale carte de transmissivité (ArcGIS).....	79
Figure 4- 14 : Graphiques de la cross validation de la carte du la transmissivité.	80

Liste des Tableaux :

Chapitre1

Tableau 1 n°-1 : Comparaison de l'étalement urbain du plateau de Mostaganem..... 26

Chapitre 2

Tableau 2 n° 1 : les paramètres de la transformation. 45

Chapitre 4

Tableau 4 n° 1 : Valeur des paramètres de RBF carte étiage. 67

Tableau 4 n° 2 : Valeur des paramètres de la RBF carte hautes eaux. 69

Tableau 4 n° 3 : Valeur des paramètres de la RBF carte isobathe..... 71

Tableau 4 n° 4 : Valeur des paramètres de la RBF carte isopieze..... 73

Tableau 4 n° 5 : Valeur des paramètres de la RBF carte toit substratum. 75

Tableau 4 n° 6 : Valeur des paramètres de la RBF de la carte du gradient hydraulique. 77

Tableau 4 n° 7 : Valeur des paramètres de la RBF carte transmissivité..... 79

Introduction Générale :

Les anciennes cartes constituent un trésor scientifique et historique, témoin de son époque elles renferment une quantité considérable des informations accumulées au fil des années grâce aux efforts des cartographe et des géographes qui ont cartographié ces cartes. Son contenu indispensable représente une mémoire en or que les générations actuelles ont le devoir d'apprécier et d'utiliser au service du développement durable.

Plusieurs domaines scientifiques s'appuient sur les anciennes cartes comme des sources fondamentales d'informations par exemple les archéologues l'utilisent pour localiser les sites enfouis, les géologues l'utilisent pour identifier les formations rocheuses et la géologie régionale et les hydrogéologues pour caractériser les nappes souterraines et leur paramètres hydrodynamiques. Cependant son utilisation sous sa forme analogique (papier) présente des limites d'où l'importance de la contribution de la géomatique qui avec des systèmes d'informations géographiques (SIG) transforme ce trésor cartographique en une base de données utile et exploitable.

La wilaya de Mostaganem compte sur la nappe de son plateau qui est d'une importance stratégique puisqu'elle pourvoie aux besoins en eau de la région, cependant malgré son potentiel cette nappe souffre d'une exploitation chaotique et irrationnelle due à une mauvaise gestion ce qui conduit à une surexploitation et à la dégradation de la qualité de ses eaux.

De ce fait, l'objectif de ce travail est de construire un SIG des paramètres hydrodynamiques de la nappe du plateau de Mostaganem afin de l'utiliser comme un outil d'aide à la décision pour la gestion rationnelle et durable de cette ressource. Ce mémoire sera axé sur les points suivants :

- Le chapitre premier est dédié à la présentation de la zone d'étude et à la mise en évidence de ses caractéristiques.
- Le deuxième chapitre traite du géoréférencement des cartes, une opération de base essentielle dans tout projet géomatique.
- Le troisième chapitre traite de la numérisation des cartes géoréférencées et de la constitution de la base de données associée.
- Le quatrième et dernier chapitre est entièrement consacré à l'application des techniques d'interpolation spatiale.

Chapitre 1 :

Localisation de la zone d'étude

I. Introduction :

La présentation de la zone d'étude constitue le premier pas pour tout travail scientifique de nature géographique ou hydrogéologique, en effet avant de commencer toute analyse ou modélisation il faut comprendre le contexte physique, géologique et hydrogéologique de l'étude pour mieux comprendre et interpréter les résultats.

Dans cette vision, la première étape consiste à fournir un aperçu général du plateau de Mostaganem qui constitue la zone d'étude de ce mémoire en plus des données cartographiques qui ont servi de base à l'ensemble du travail effectué.

II. Localisation géographique

Le Plateau de Mostaganem est situé sur la wilaya de Mostaganem. Cette dernière est constituée de 32 communes réparties sur 10 Dairats. Elle s'étend sur une superficie de 2.269 Km² et compte une population estimée au 31/12/2000 à 662.581 habitants, soit une densité de 737 118 habitants. L'agglomération de Mostaganem est située à quatre-vingts km à l'Est d'Oran. Elle se localise en bordure Ouest du Plateau de Mostaganem.

Le Plateau de Mostaganem s'étend sur près de 750 km², du sud-ouest au nord-est du chef-lieu. Il est limité au Nord par l'Oued Chélif et sa vallée, au Sud par la Plaine des Bourdjias qui se prolonge par la dépression de la Macta, à l'Est par les djebels Ennaro et Belhacel et à l'Ouest par le bourrelet côtier qui l'isole de la mer méditerranée. (Amari & al, 07 novembre 2022)

Administrativement, le plateau englobe onze communes de la wilaya de Mostaganem : Mostaganem, Aïn Tedles, Sour, Bouguirat, Sirat, Souafia, Mesra, Aïn Sidi Cherif, Mansourah, Touahria et Sayada. Le relief de la wilaya se divise en quatre unités morphologiques distinctes : les vallées basses de l'Ouest, les Monts du Dahra, le plateau de Mostaganem proprement dit, et les vallées de l'Est (Allaoui, 2020).

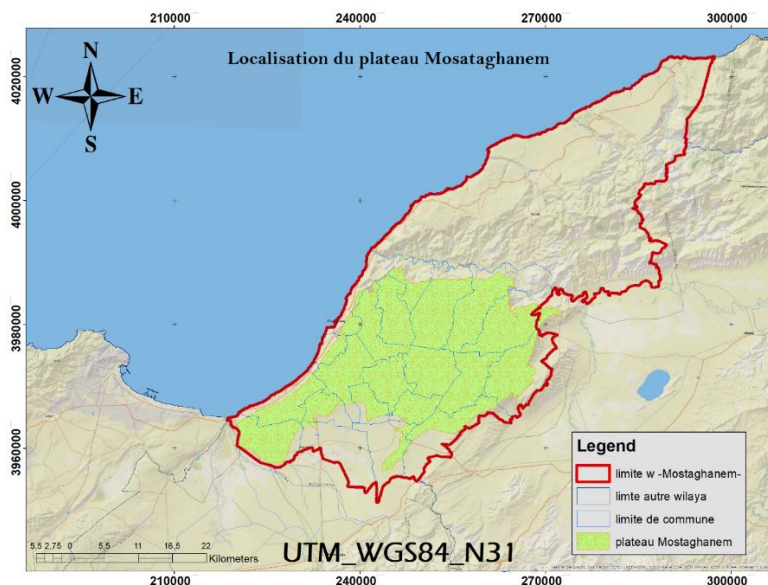


Figure 1- 1 : Carte de localisation du plateau de Mostaganem (ArcGIS).

II.1 Relief et topographie

En bordure de la mer méditerranéenne, le plateau de Mostaganem se présente comme une aire tabulaire, comprise entre la vallée du Chélif au Nord, la dépression de la Mactaa au Sud, enfin la vallée de la Mina et les Monts de Bel Hacel à l'Est.

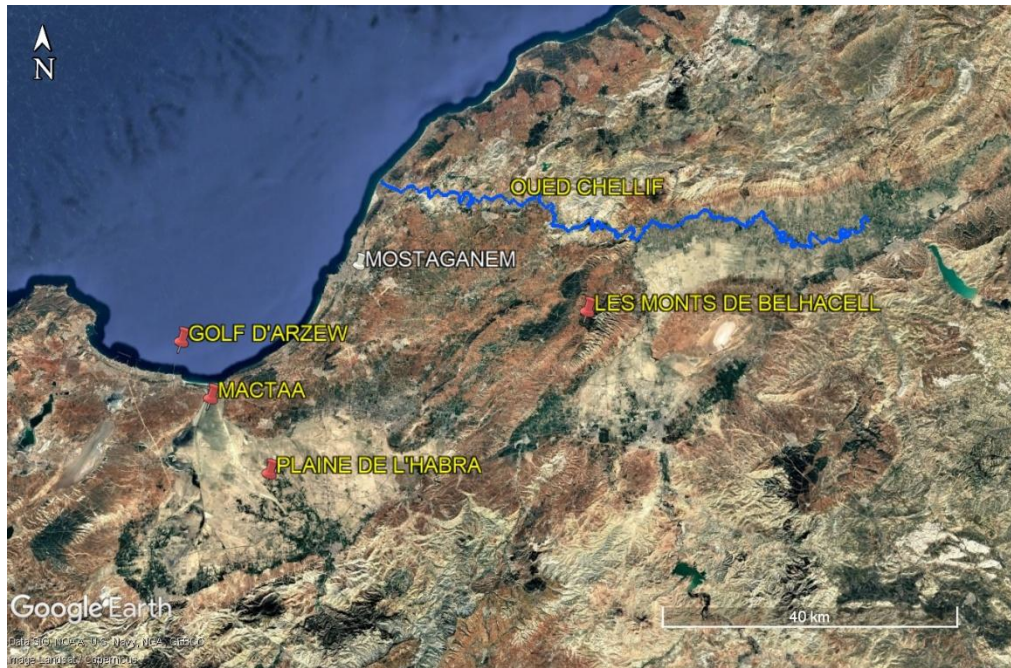


Figure 1- 2 : Relief du Plateau (Google Earth).

Note :

La limite de la nappe du Plateau de Mostaganem dépend des terrains imperméables qui l'entoure. De ce fait la superposition de la carte géologique et celle hydrogéologique de la DEMRH a permis de tracer une limite claire et cohérente astreignant ainsi la nappe aux terrains perméables qu'elle occupe.

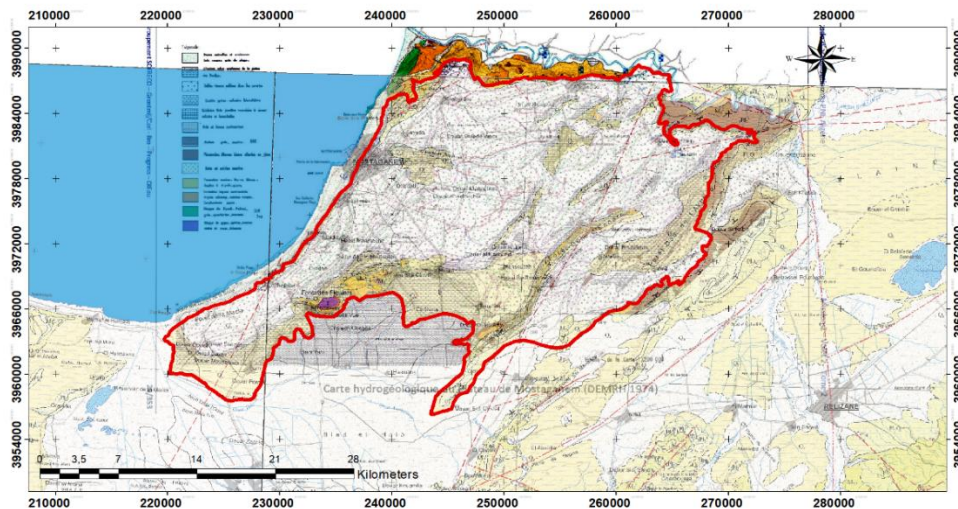


Figure 1- 3 : Limite de la nappe du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).

Ce plateau s'abaisse régulièrement vers l'Ouest en direction de la plaine de l'Habra et du Golfe d'Arzew. Il comporte une série de rides et de dépressions parallèles orientées Sud-Ouest/Nord-Est, dont l'altitude voisine 200 m, s'abaisse progressivement jusqu'à 100 m au niveau de la Mactaa. Au Nord, le plateau surplombe régulièrement la basse vallée du Chélif, montrant une suite de falaises dont les hauteurs varient de 150 m à 200 m. Au Nord-Est, il vient buter sur l'éperon crétacé du Djbel Diss (Dahra) qui culmine à une altitude de 400 m. Au Sud-Est, il est bordé par une ligne de relief matérialisée par les fortes de l'Akboube et d'Ennaro qui le sépare de la plaine de Relizane.

Le plateau de Mostaganem est bien individualisé même si ses limites topographiques sont malaisées à tracer. Il appartient administrativement à la wilaya de Mostaganem, et est couvert par 13 communes. (Bellal, 2016).

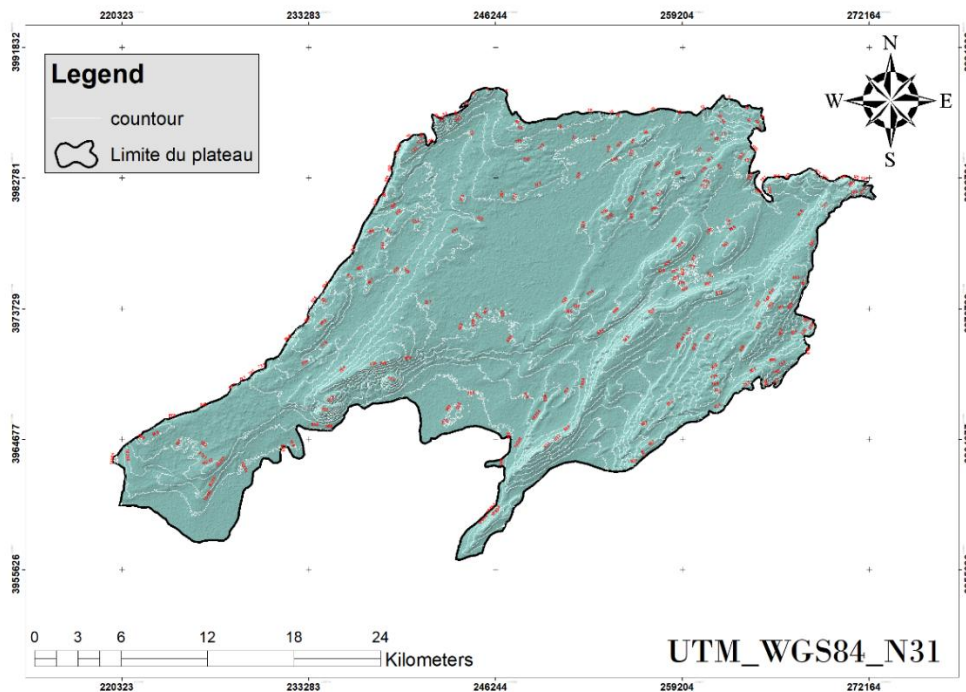


Figure 1- 4 : Carte topographique du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).

II.2 Géologie régionale :

L'Algérie est composée de trois domaines principaux :

- Un domaine tellien (Tell septentrional)
- Un domaine présaharien (domaine des Hautes Plaines et Atlas Saharien)
- Un domaine saharien (plateforme saharienne). ([Amari & al, 07 novembre 2022](#))

La région de Mostaganem qui se trouve dans le Tell occidental repose sur un substratum plissé du Miocène et du Pliocène. Elle comporte deux grands ensembles morpho-structuraux : le Plateau de Mostaganem (dalle grésocalcaire stable) et les Monts du Dahra (reliefs marneux et argileux instables, en proie à une intense déformation alpine).

Le substratum miocène est essentiellement constitué par d'épaisses couches de marnes et d'argiles marines. Ce substrat supporte la forme plissée et il est souvent érodé.

Le Mio-Pliocène et le Quaternaire sont dominés par des dépôts détritiques (grès) et des calcaires marins ou lacustres, constituant la roche mère des plateaux. ([Bellal, 2016](#))

Les formations de surface sont au Sur le littoral, on trouve des encroûtements calcaires (calcrêtes) et des dépôts de sables dunaires quaternaires abondants, par exemple dans la région d'Aïn Nouissy. ([Ramdane, 2017](#)).

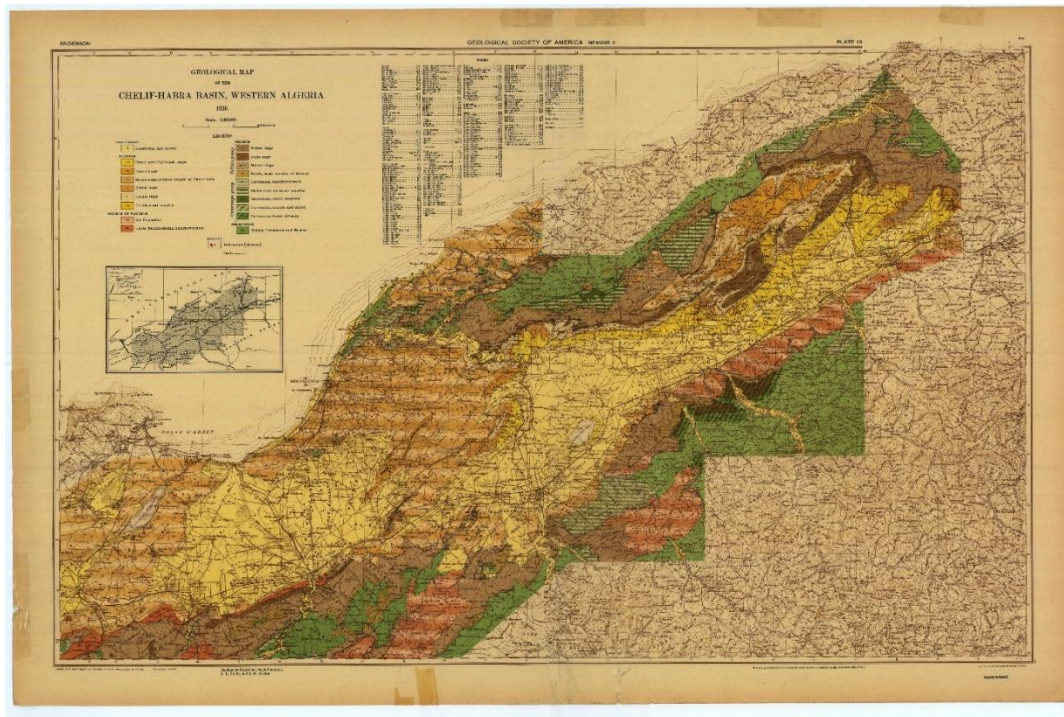


Figure 1- 5 : Carte géologique de la wilaya de Mostaganem.

II.3 Climatologie :

Le climat de la wilaya de Mostaganem est celui d'une région méditerranéenne. Il est caractérisé par une saison estivale chaude et sèche et une saison hivernale froide et humide.

La wilaya de Mostaganem a une pluviosité variant de 250 à 400 mm d'eau par an. Celle-ci pouvant atteindre 400 à 500mm par an sur le plateau de Mostaganem et 500 à 700mm par an sur les piémonts de Dahra. Généralement la plus grande chute de pluie est enregistrée pendant la saison hivernale correspondant aux mois de Novembre à Février ; le contraire est constaté au cours de la saison estivale, période pour laquelle les pluies sont très réduites. (Allaoui 2020)

II.4 Hydrographie :

Le plateau de Mostaganem se caractérise par un bassin versant avec un gradient d'écoulement orienté du nord vers le sud. Les zones en rouge et orange situées au sommet du plateau sont très vulnérables à l'érosion à cause de la pente tandis que l'eau se concentre dans les zones les plus basses en vert les rendant plus exposées aux inondations et à la sédimentation.

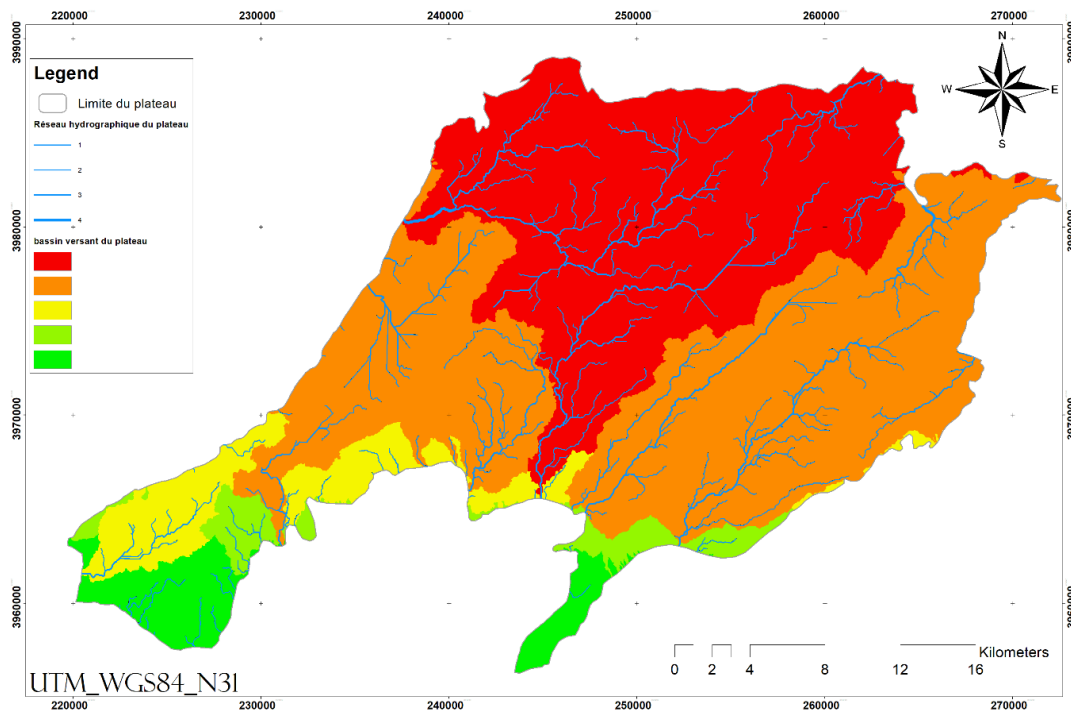


Figure 1- 6 : Carte des bassins versants et cours d'eau du Plateau de Mostaganem (ArcGIS).

Le réseau hydrographique se compose de quatre niveaux de cours d'eau, ils sont représentés par des lignes bleues d'épaisseur croissante. Les cours d'eau du premier niveau représentent les petits affluents en haut de bassin tandis que le quatrième niveau forme les axes de drainage principaux. La densité de ces cours d'eau témoigne de la forte capacité de drainage du plateau.

- Les zones **rouges** occupent la partie centrale nord du plateau, elles se caractérisent par leur élévation d'altitude et les nombreux petits affluents.
- Les zones orange couvrent la grande partie du Plateau de Mostaganem, elles représentent les zones moyennes qui a un drainage modéré.
- Les zones jaunes indiquent la transition entres les hautes terres et les plaines, elles sont visibles dans la partie centre-sud du plateau de Mostaganem.
- Les zones vert clair et vert foncé sont concentrées au sud et au sud-ouest du Plateau, ils sont les zones d'accumulation et exutoires, où l'eau converge avant de s'écouler du Plateau.

II.5 Hydrogéologie :

Dans son ensemble, le Plateau de Mostaganem se superpose sur un substratum marneux imperméable, surmonté de grès sableux ou argileux sableux qui contiennent l'aquifère principale où on retrouve aussi les sables qui recouvrent les formations précédentes appelées « les sables du plateau de Mostaganem ». Parfois, nous trouvons une croûte calcaréo-gréseuse, associée à un sol rouge (Ouréah) (Tiab, 1999) L'épaisseur des formations aquifère varie d'un endroit à un autre et diminue (100 à 120 m : Calabrien) en allant de l'Est-Nord-Est vers l'Ouest-Sud-Ouest. (Aberkane, 2016).

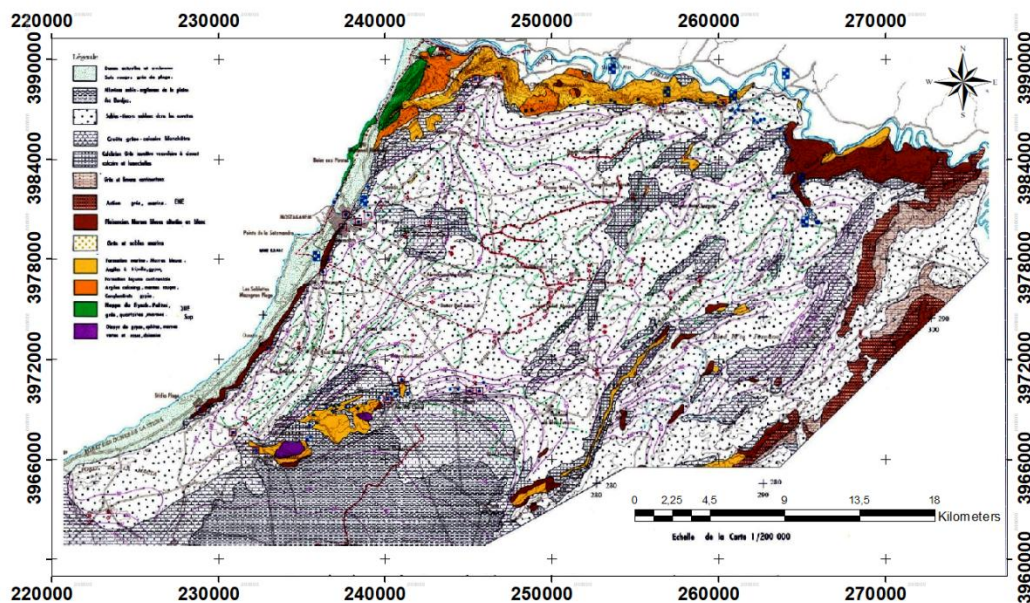


Figure 1- 7 : Carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem UTM 31(DEMRH 1974) (modifié).

III. L'étalement :

La wilaya de Mostaganem à connue des changements sur l'occupation du sol de son territoire :

En 1985, les terrains agricoles dominent la wilaya de Mostaganem avec une couverture d'environ 64% de la surface. Les zones de terrain nu occupent 20% du territoire, réparties sur la wilaya. La forêt est concentrée au sud-ouest et représente moins de 10% de la surface. L'urbanisation est encore très limitée 5,5% du territoire, situé principalement le long de la côte et à quelques agglomérations secondaires. C'était un territoire rural équilibré, avant les grandes transformations ultérieures.

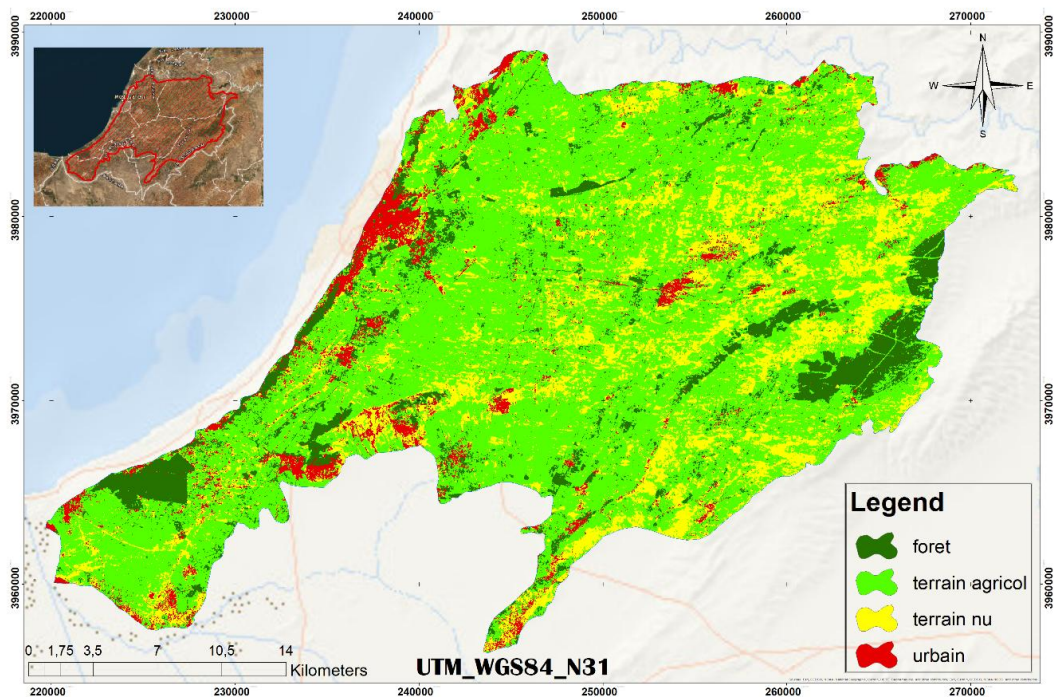


Figure 1- 8 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 1985, (Landsat5).

En 2013, le territoire de la wilaya de Mostaganem a changé notablement par rapport à 1985. Les terrains agricoles restent dominants mais elles reculent légèrement. La forêt connaît une grande extension de la surface de la wilaya, visible par les taches vert foncé bien développées à l'est et au sud-ouest, témoignant des efforts de reboisement effectués durant cette période. L'urbain augmente avec une extension claire des taches rouges le long de la côte nord-ouest et l'apparition du nouvelles constructions urbaines dispersées à l'intérieur du territoire. Le terrain nu est toujours réparti sur l'ensemble de la wilaya. En résumé, L'année 2013 marque une période de transition à cause du reboisement, l'urbanisation à commencer l'accélération et la pression sur les terres agricoles devient perceptible.

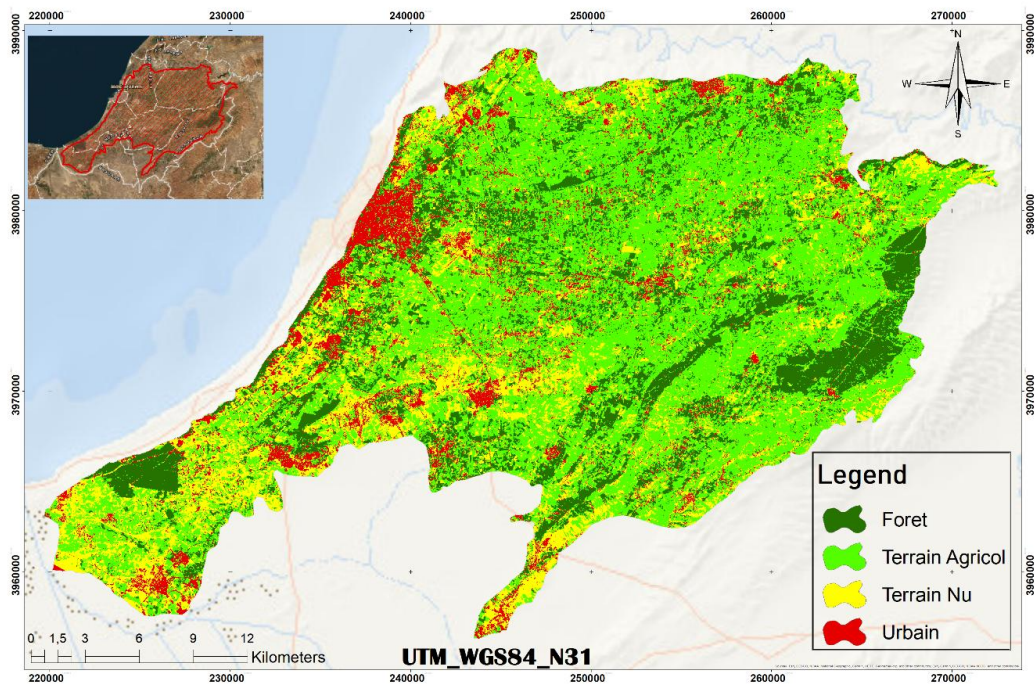


Figure 1- 9 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 2013, (Landsat9).

En 2024, la wilaya de Mostaganem a connu une énorme transformation du territoire. L'urbanisation est l'évolution la plus claire à visualiser, les taches rouges sont désormais présentes et dispersées sur toute la wilaya et non plus concentrées uniquement sur la côte.

Cette évolution de l'urbain vers l'intérieur du territoire a causé un étalement urbain incontrôlé et une pression démographique très intense. Le terrain agricole restant la classe dominante mais de plus en plus fragmentée et morcelée par les taches urbaines. La forêt recule et c'est remarquable par les grandes taches vert foncé de 2013 se sont réduites.

Le terrain nu diminue fortement, les zones jaunes sont nettement moins étendues, notamment dans la partie sud-ouest. En résumé, la carte 2024 montre que l'urbanisation ne se limite plus à la côte mais envahit l'ensemble du territoire, fragmentant les espaces agricoles et naturels et signalant un besoin urgent de planification et de gestion durable du foncier.

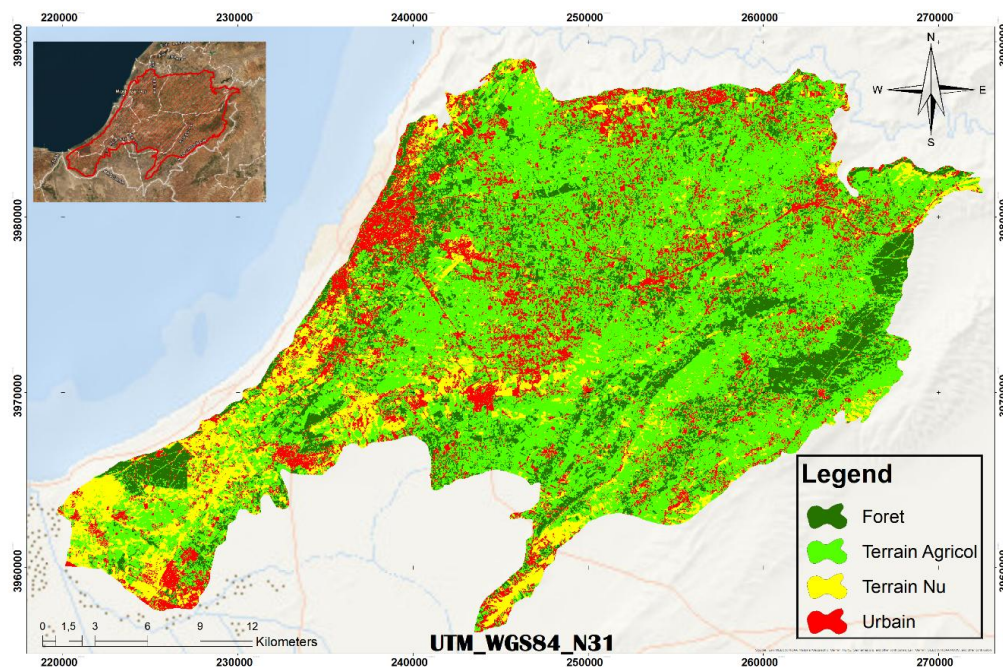


Figure 1- 10 : Carte d'occupation du sol du plateau de Mostaganem 2024, (Landsat9).

Tableau 1 n°-1 : Comparaison de l'étalement urbain du plateau de Mostaganem.

Classe	1985		2013			2024		
	Count	Surface (ha)	Count	Surface (ha)	Vs 1985	Count	Surface (ha)	Vs 2013
Urbain	49 865	44,88	81 017	72,92	+62,5%	146 426	131,78	+80,7%
Foret	87 249	78,52	175 802	158,22	+101,5%	137 500	123,75	-21,8%
Terrain agricole	579 837	521,85	467 931	421,14	-19,3%	502 674	452,41	+7,4%
Terrain nu	180 376	162,34	172 577	155,32	-4,3%	110 264	99,24	-36,1%

Entre 1985 et 2024, la wilaya de Mostaganem a connu une grande transformation de son territoire. L'urbanisation a presque triplé, reflétant une croissance démographique soutenue. Le terrain agricole, bien que toujours dominant, a reculé mais avec une légère reprise en 2024. La forêt a doublé grâce au reboisement avant de perdre du terrain à cause des incendies. Le terrain nu a diminué de près de 40%, signe d'une mise en valeur progressive des terres. En d'autres termes, le territoire évolue vers une urbanisation croissante au détriment des espaces naturels et agricoles.

IV. Source de données :

La source des cartes étudiée dans ce projet de fin d'étude sont extraites de la thèse de Jack Gaucher intitulée « étude hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (Algérie) » ; ce sont des cartes thématiques des différents paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques de la nappe du Plateau illustrées dans la thèse de doctorat présentée à l'université Claude Bernard -Lyon 1 en 1981. Nous avons retravaillé onze cartes indispensables à l'aide de décision pour une meilleure gestion de la nappe.

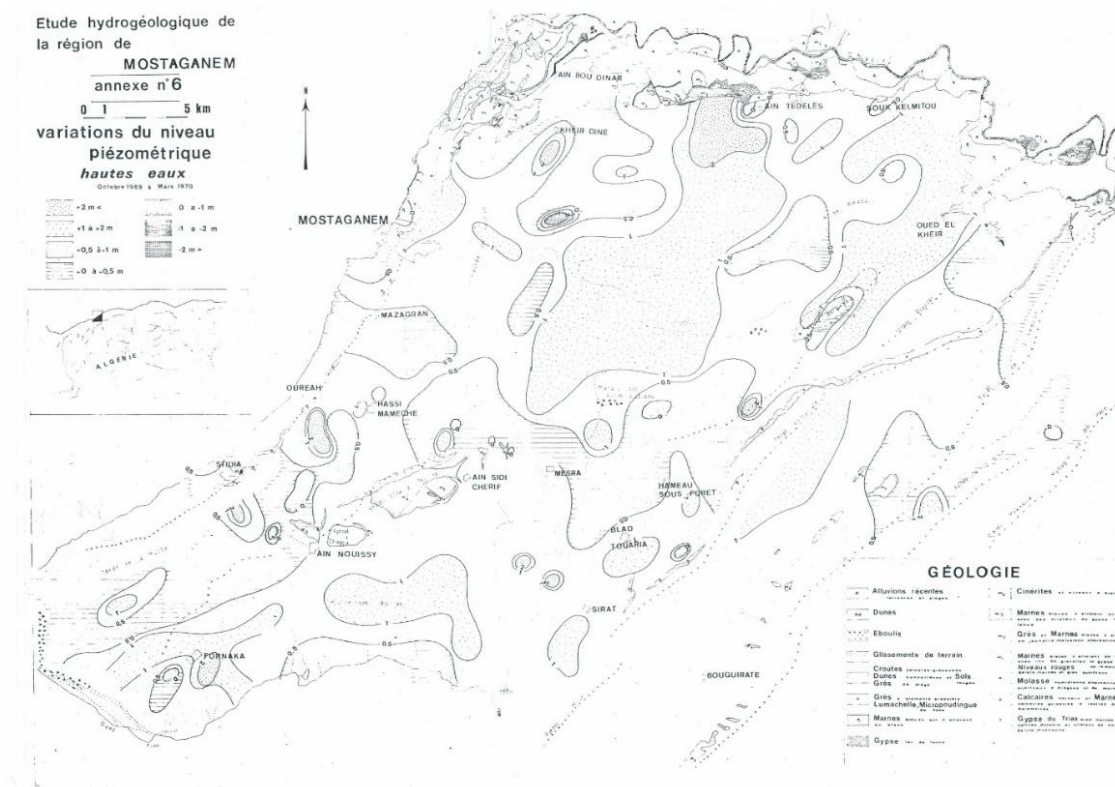


Figure 1- 11 : Carte des hautes eaux (GAUCHEZ 1970).

Cette carte représente le Plateau de Mostaganem et illustre les courbes du niveau piézométrique en période de hautes eaux, cartographiée manuellement par JACK GAUCHEZ sur la base de la campagne piézométrique réalisée entre 1969 et 1970.

IV.1 Ces points forts :

- ✓ La carte contient une échelle graphique claire (de 0 à 5 km) ce qui rend l'estimation des distances et des surfaces sur le terrain facile à calculer.
- ✓ Une légende complète et bien détaillée couvrant les variations piézométriques et géologiques.
- ✓ La flèche du nord indique clairement la direction et la localisation de la zone d'étude dans l'espace.

- ✓ La lisibilité des courbes isopièzes.
- ✓ Les toponymes bien répartis.
- ✓ La carte couvre une zone suffisamment étendue pour offrir une vue d'ensemble de la zone.

IV.2 **Ces points faibles :**

- ⊗ L'absence de courbe de niveau topographiques rend impossible la détermination précise du relief.
- ⊗ La distinction difficile entre les catégories de la légende car la carte est en noir et blanc.
- ⊗ Aucun système de coordonnées ou projection n'est mentionné.
- ⊗ Le manque du carroyage ou du quadrillage de référence.
- ⊗ Certains endroits sont illisibles ou à peine visibles en raison de la qualité de l'impression et de l'ancienneté de la carte.
- ⊗ Il n'y a pas une date précise uniquement une période d'observation piézométriques (octobre 1969 / Mars 1970).

Les cartes des autres paramètres présentent les mêmes points forts/faibles, que pour celle des Hautes eaux, de ce fait elles ont toutes été traitées de la même manière. [Annexes]

V. **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté la zone d'étude et identifié ses principales caractéristiques géographiques et administratives en constituant ainsi le cadre de référence spatial de notre travail.

L'étalement urbain entre 1985 et 2024 avec la télédétection a mis en évidence de profondes transformations de la wilaya de Mostaganem. L'urbanisation s'est considérablement étendue se propageant progressivement sur l'ensemble du territoire et non plus seulement sur la région côtière tandis que les terres agricoles bien que toujours dominantes ont connu une fragmentation croissante.

Après la phase de reboisement la forêt a commencé à progresser de manière significative et la superficie des terrains nus a considérablement diminué grâce à l'aménagement du territoire.

Ces dynamiques reflètent des pressions démographiques et spatiales croissantes posant des défis importants à l'aménagement du territoire et à la gestion durable des ressources naturelles (alimentation de l'eau par exemple). Elles constituent le contexte essentiel à la compréhension des analyses qui seront présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 :

Le Géoréférencement.

I. Introduction :

L'évaluation des données cartographiques anciennes est un enjeu clé des études géographiques et hydrogéologiques. En effet, ces documents souvent disponibles uniquement sous format papier, contiennent des informations précieuses sur l'état historique de la zone d'étude.

Pour pouvoir traiter ces informations, il nous a fallu d'abord les scanner car l'intégration de ces informations dans un système d'information géographique (SIG) implique nécessairement une étape fondamentale « le géoréférencement ». Ce processus est essentiel pour permettre la superposition, la comparaison et l'analyse des différentes couches cartographiques au sein d'un même environnement SIG.

II. Cadre théorique :

Le travail de traitement des cartes papier est passé par plusieurs étapes, en commençant par :

Scanner :

Un scanner est un appareil qui permet de numériser des documents physiques, des images ou même des objets et de les convertir en un format numérique qui peut être visualisé, édité et stocké sur un ordinateur. C'est un peu comme une photocopieuse numérique qui capture le contenu d'un document ou d'une image et l'enregistre sous forme de fichier.[1].

Nous avons utilisé un scanner pour pouvoir digitaliser les cartes de la nappe du plateau, qui sont à l'origine en format papier puisqu'elles sont extraites de la thèse de doctorat de Gauchez (1981).

Cette étape nous a permis de commencer par afficher la carte dans un environnement optimal au géoréférencement, pour pouvoir par la suite la numériser et obtenir ainsi un SIG.

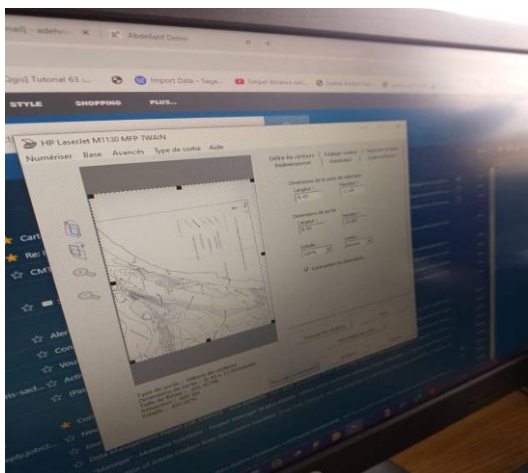


Figure 2- 1 : Traitement de scanner.



Figure 2- 2 : Scanner utilisé.

II.1 Définition de géoréférencement :

Le géoréférencement consiste à utiliser des coordonnées cartographiques pour affecter un emplacement spatial à des entités cartographiques. Tous les éléments d'une couche de carte ont une position et une étendue géographiques spécifiques qui leur permettent d'être repérés sur la surface de la terre, ou près de celle-ci. La capacité de localiser avec précision des entités géographiques est essentielle pour la cartographie et le SIG. [2].

Il existe plusieurs définitions du terme « géoréférencement » ; par exemple Sommer et Wade définissent le géoréférencement comme « l'alignement de données géographiques sur un système de coordonnées connu afin qu'elles puissent être visualisées, interrogées et analysées avec d'autres données géographiques » (Sommer & al, 2006).

Des conceptions plus générales incluent le domaine du géoréférencement multimédia (Zheng, Zha et Chua, 2011) et l'exploration des moyens d'identification des objets géographiques en général.

De manière générale, trois types d'informations distincts peuvent être identifiés et utilisés pour référencer les objets géographiques :

- 1) Les informations géométriques qui décrivent les propriétés géométriques d'un objet comme le tracé et la forme d'un tronçon de route.
- 2) Les informations topologiques qui concernent les propriétés et sont préservées lors de déformations continues des objets ; dans le contexte du géoréférencement, la structure graphique induite par les réseaux de certains objets géographiques, comme les routes ou les rivières, est d'une importance primordiale pour les analyses topologiques.
- 3) Les informations sémantiques qui eux, comprennent divers types de propriétés sémantiques qui peuvent être liées à un lieu géographique, comme le nom d'un lieu ou d'une route.

(Affek,A,2013).

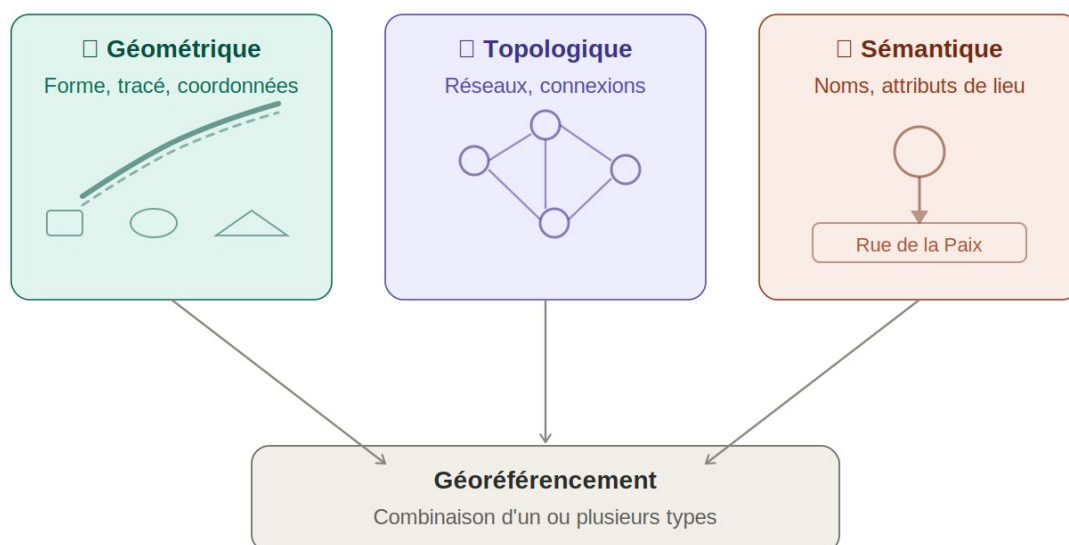


Figure 2- 3 : Organigramme de l'identification de l'information géographique.

II.2 Géoréférencement et système de projection :

Le processus d'identification des objets géographiques et de leur rattachement à des emplacements géographiques est appelé « géoréférencement ». Lorsqu'une carte est créée de toutes pièces, l'auteur définit les objets géographiques, leurs positions ainsi que les correspondances entre eux.

Le géoréférencement s'effectue généralement à l'aide d'un système de référence géodésique tel que le WGS-84 (National Imagery and Mapping Agency, 2000), qui comprend un système de coordonnées standard pour la Terre, un ellipsoïde de référence et un géoïde qui définit un niveau nominal de la mer. D'autres systèmes de référence peuvent également être adoptés selon les domaines d'application spécifiques.

Cependant, le processus d'attribution des objets à des emplacements est souvent complexe. Les différents types d'objets géographiques à faire correspondre sur une carte vont des images raster, telles que les images aériennes ou satellitaires, aux entités figurant sur des cartes vectorielles numériques préexistantes. Selon le type de correspondance requis, diverses méthodes et algorithmes ont été développés. (Affek,A,2013).

Conformément à la terminologie SIG, les données obtenues à partir des cartes sont des données secondaires (Gregory & all 2007). Une carte ne présente pas les résultats de la mesure directe de la réalité, mais constitue un modèle de la réalité basé sur l'interprétation du cartographe et adapté à l'échelle et à l'application de la carte (Pasałowski, 2010).

Cependant, il est impossible de recueillir des données brutes sur le paysage il y a un siècle ou plus (du type de celles que nous obtiendrions aujourd'hui à partir d'images satellites ou de photographies aériennes) car la technologie nécessaire à cela n'était évidemment pas encore connue à l'époque. La nature secondaire des données garantit donc automatiquement que leur valeur informationnelle ne peut être supérieure à celle des données sources.

Toutefois, un processus professionnel de transformation des anciennes cartes papier en format numérique augmente leur valeur utile (cartométrie), tout en minimisant les pertes inévitables de valeur informationnelle. Comparativement au géoréférencement des cartes actuelles, le travail équivalent avec les cartes anciennes est bien plus complexe. Les cartes papier contemporaines ont généralement des paramètres de projection connus, basés sur des systèmes de coordonnées géographiques géocentriques (centrés sur la Terre), avec des quadrillages² ou des grilles mesurées³ marqués sur chaque feuille. Si l'impression de la carte source et la numérisation sont effectuées correctement (avec un scanner grand format calibré, une résolution appropriée et un format de fichier image adapté), il suffit de définir les coordonnées de deux coins sélectionnés de la carte et d'enregistrer l'image à l'aide de la transformation de Helmert (translation, rotation, changement d'échelle). (Affek,A,2013).

Pour cela, il est recommandé de veiller à ce que le système de référence cartographique et la projection du cadre de données dans l'application SIG soient identiques à ceux de la carte rectifiée. Dans le cas des cartes historiques, la procédure dépend du fait que la carte donnée ait été réalisée ou non sur la base d'un réseau de mesures géodésiques (Affek, 2012), défini comme un réseau de points convenablement sélectionnés et stabilisés sur le terrain dont les

interrelations spatiales mutuelles sont établies au moyen de mesures géodésiques (Pařawski 2010). ([Affek,A,2013](#)).

II.2.1 Géoréférencement de cartes non basées sur un réseau géodésique :

Le géoréférencement d'une carte non basée sur un réseau géodésique nécessite une couche de référence, c'est-à-dire une autre carte déjà alignée avec une précision satisfaisante.

Cependant, avant d'aligner l'ancienne carte sur la couche de référence, il est nécessaire de restaurer la forme géométrique originale des feuilles numérisées.

Les cartes non basées sur des réseaux géodésiques sont géoréférencées à l'aide de points de contrôle au sol (GCP) attribués à des objets caractéristiques présents sur les deux cartes. Les meilleurs objets pour cet usage sont les églises, les ponts, les carrefours, les sommets non boisés les plus importants et le cours des ruisseaux (Podobnikar, 2009).

Plus il y a de points indiqués, plus l'alignement est précis. En cas d'imprécisions importantes sur une carte, il est judicieux de localiser les points même dans des endroits moins bien définis, dans la mesure où la différence entre les emplacements de l'objet donné sur deux cartes est supérieure à l'imprécision potentielle de la carte. ([Affek,A,2013](#)).

II.2.2 Géoréférencement de cartes basées sur un réseau géodésique :

Pour un géoréférencement correct d'une carte basée sur un réseau géodésique, il est essentiel de connaître les bases mathématiques et géodésiques qui la sous-tendent, en particulier le système de référence cartographique ou système de coordonnées géographiques, ainsi que la projection utilisée. Le deuxième levé de l'Empire austro-hongrois a été réalisé sur la base du système de référence de Vienne, avec comme point d'origine la tour Saint-Étienne (St. Stephan Turm) (Mugnier 2004). ([Affek,A,2013](#)).

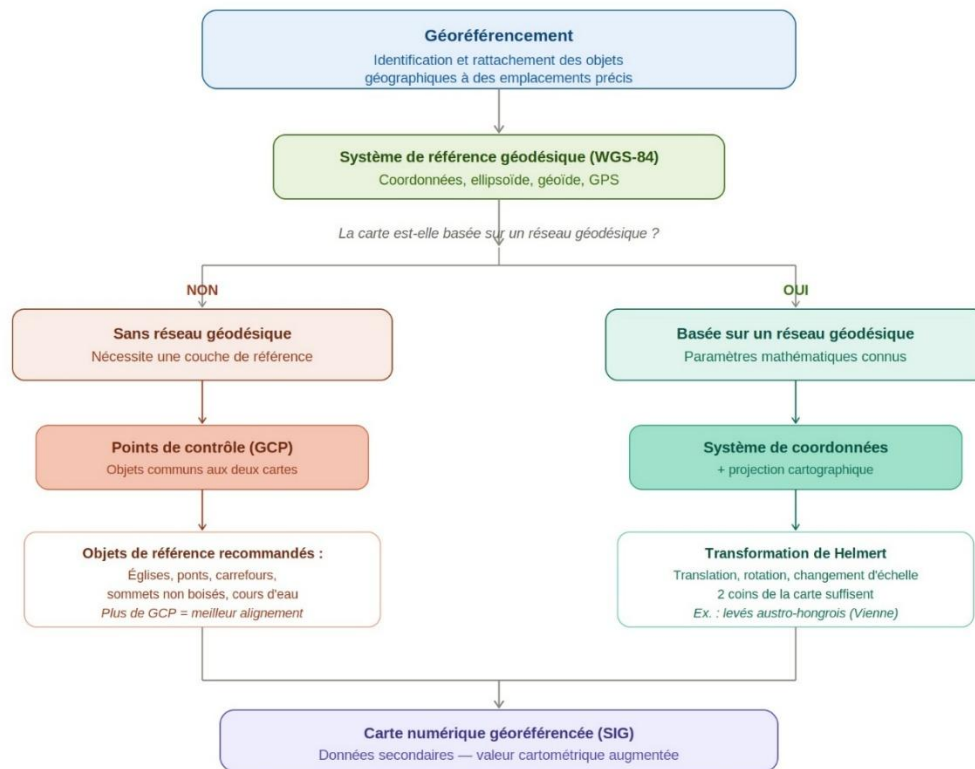


Figure 2- 4 : Organigramme de la relation entre le géoréférencement et le système de références.

II.3 L'importance du géoréférencement :

Avec le passage aux sources cartographiques numériques, l'utilisation des cartes papier a considérablement diminué au cours des quinze dernières années, au point qu'une grande partie des précieuses informations qu'elles contiennent risque d'être oubliée ou ignorée. De nombreuses bibliothèques et archives ont relevé ce défi en numérisant une partie de leurs collections de cartes, rendant ainsi les images raster obtenues plus universellement accessibles via Internet.

Certaines sont même allées plus loin et ont transformé ces images raster, grâce à un processus appelé géoréférencement, en images raster géospatiales compatibles avec les logiciels de systèmes d'information géographique (SIG). Les cartes géoréférencées de la collection de cartes David Rumsey (Cartography Associates, 2017) sont un excellent exemple de la façon dont les images raster géospatiales historiques peuvent être utilisées comme calques dans Google Earth ou Google Maps.

Plus récemment, quelques bibliothèques et archives ont franchi une nouvelle étape et ont commencé à expérimenter l'extraction de caractéristiques spécifiques d'intérêt à partir d'images raster géospatiales afin de créer des sources entièrement nouvelles de données vectorielles géospatiales. Ces données peuvent être manipulées de manière innovante, ce qui était impossible auparavant.

Pour être compatibles avec les logiciels SIG, les entités extraites doivent être des vecteurs de points, de lignes ou de polygones (données vectorielles géospatiales) comportant des

informations de coordonnées géographiques, représentant des entités géographiques réelles. Ces vecteurs sont organisés en couches monotypes (par exemple, tous les segments de route), qui constituent les unités fondamentales utilisées par les logiciels SIG. Ces couches sont généralement créées à partir de photographies aériennes, de données satellitaires ou de relevés de terrain. Les cartes historiques nous permettent de remonter le temps pour reconstituer les données originales.

(From Paper Map to Geospatial Vector Layer : Demystifying the Process Peter Pellerl).

II.4 Méthodes de géoréférencement :

Hill (2006) établit une distinction entre les moyens informels et formels de référence à des lieux. Le **géoréférencement informel** décrit les références familières à des objets géographiques, tels que les noms de lieux, tandis que le **géoréférencement formel** couvre le domaine du référencement précis de localisations en sciences et technologies, par exemple à l'aide de systèmes de référence spatiale.

(Georeferencing: a review of methods and applications Andreas Hackeloeer, Klaas Klasing, Jukka M. Krisp & Liqiu Meng).

Par ailleurs, trois autres moyens de géoréférencement existent et qui sont :

II.4.1 Géoréférencement absolu :

Le géoréférencement absolue est le processus d'alignement des données spatiales, telles que les cartes, l'imagerie aérienne ou les documents numérisés, sur un système de coordonnées spécifique afin qu'elles correspondent avec précision aux emplacements du monde réel.

Ce processus implique l'association d'entités sur les données avec des coordonnées géographiques, ce qui permet d'utiliser les données dans les systèmes d'information géographique (SIG) pour l'analyse spatiale et la cartographie. [3].

Grâce à un carroyage avec des amorces de coordonnées, on va pouvoir se servir de ces coordonnées pour géoréférencer l'image. A cet effet, il faudrait néanmoins connaître le système de coordonnées utilisé, ce qui peut nécessiter des recherches.

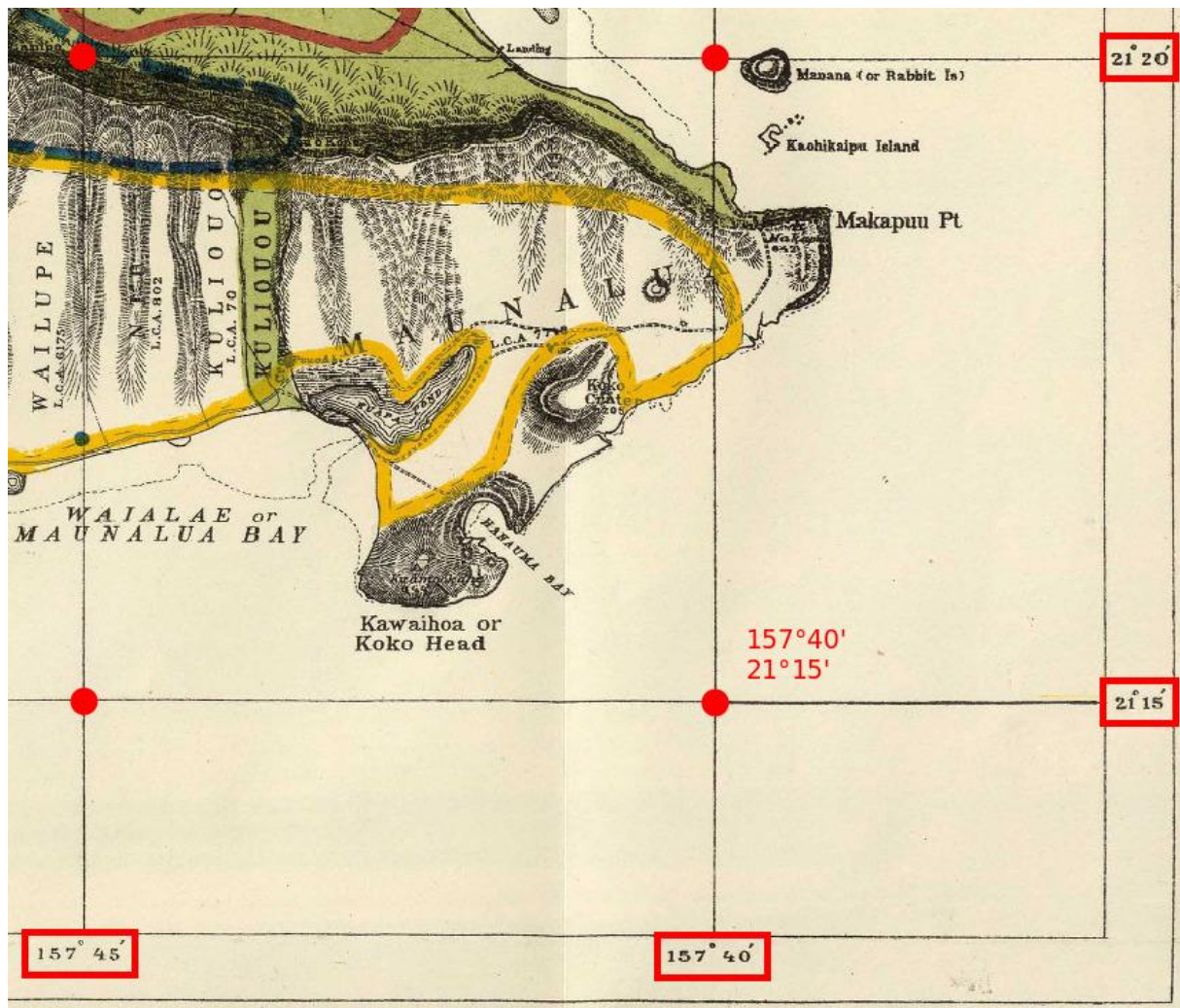


Figure 2- 5 : Carroyage avec amorce de coordonnées.[4]

II.4.2 Géoréférencement relatif :

Le géoréférencement relatif est une technique qui consiste à positionner une image, un nuage de points ou une carte par rapport à d'autres points de coordonnées connues, sans nécessairement recourir à un système de coordonnées géodésiques absolues. La précision est donc évaluée relativement à ces points de référence, et non par rapport à un repère global indépendant. [2].

Si l'image ne possède pas d'indications de coordonnées, il va falloir utiliser une couche déjà géoréférencée possédant une zone commune avec l'image à géoréférencé. On pourra alors indiquer que tel point sur l'image correspond à tel point sur la couche déjà géoréférencée. Cette méthode sera employée pour caler des photographies aériennes par exemple.

La carte résultante aura le même système de coordonnées que la couche de référence. La précision du calage dépend alors notamment de la précision de la couche de référence.

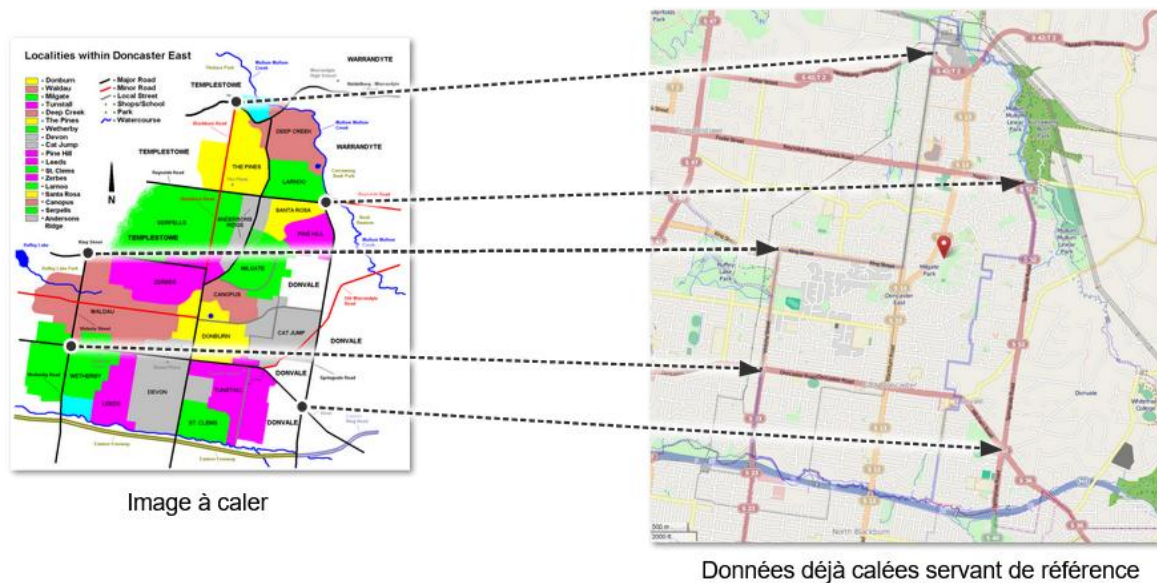


Figure 2- 6 : Géoréférencement relatif.

II.4.3 Géoréférencement par Google Earth :

Google Earth est une application développée par Google lui-même, elle nous permet d'avoir une multitude de cartes du monde pour n'importe quelle région de la Terre en un rien de temps grâce à une connexion internet et cette superbe application.

Sur Google Earth, nous pouvons non seulement trouver n'importe quel point sur le globe terrestre mais retrouver aussi les coordonnées géographiques de ces points.

Les points que l'on peut retrouver sur Google Earth sont de diverses natures, ça peut être un parc, un port, un restaurant, une montagne, une ville, un bâti...etc.

Lorsqu'un point pareil est indiqué sur une carte, il nous suffit simplement de le chercher sur Google Earth en tapant dans la barre de recherche son nom, et il va nous l'afficher avec ses coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude) qui seront visibles.

Ce qui est intéressant avec Google Earth est que non seulement elle va nous donner la possibilité de transformer ces coordonnées UTM en degré décimal mais aussi l'inverse, c'est-à-dire du degré décimal vers UTM.

Sur les logiciels de système d'information géographique, on introduit directement les coordonnées à conditions qu'elles soient dans le même système de projection. Cette opportunité permet de visualiser les coordonnées de chaque détail qu'on a défini.

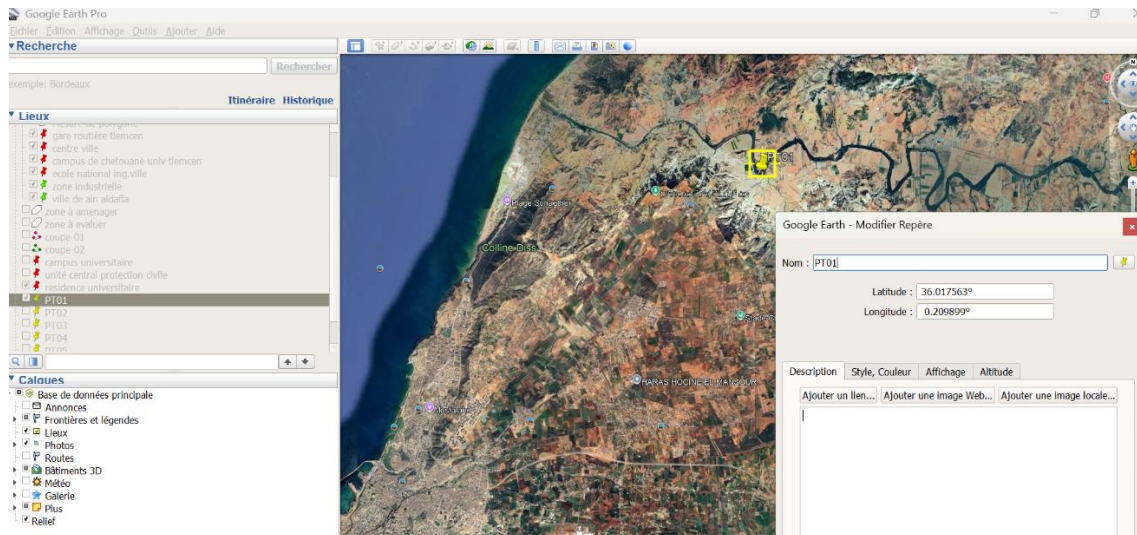


Figure 2- 7 : Coordonnées du détail recherché.

II.5 Logiciels utilisés :

II.5.1 MapInfo :

MapInfo est un Système d'information géographique (SIG) à l'origine Bureautique créé dans les années 1980 aux États-Unis. C'est un logiciel qui permet de réaliser des cartes en format numérique. MapInfo est conçu autour d'un moteur d'édition de cartes qui permet la superposition de couches numériques.

MapInfo est un logiciel de SIG, parmi les plus répandus dans le monde (60 pays et 21 langues). Son succès tient essentiellement de :

- Sa simplicité d'utilisation
- Son langage de programmation (Map Basic qui permet d'ajouter de nouvelles applications répondant aux exigences de tous projets).
- Sa puissance de gestion et de traitement de données.
- Ses capacités d'échange avec les formats standards bureautiques et les bases de données.



MapInfo utilise un format de données propriétaire basé sur plusieurs fichiers complémentaires :

- ❖ .TAB : fichier de définition de la table.
- ❖ .DAT : fichier contenant les données attributaires.
- ❖ .MAP : fichier contenant les objets graphiques
- ❖ .ID : fichier d'index des objets.

Fonctionnalités principales :

MapInfo Professional offre un ensemble de fonctionnalités adapté aux besoins de cette étude :

- Géoréférencement des cartes raster.
- Numérisation des entités géographiques (points, lignes et polygones).
- Gestion des tables attributaires et des bases de données associées.
- Requêtes spatiales et attributaires.
- Mise en page cartographique et export des cartes.
- Analyse spatiale et jointures entre couches thématiques.

II.5.2 Globale Mapper :

Le logiciel **Global Mapper** est une application SIG abordable et facile à utiliser qui donne accès à une variété inégalée de jeux de données spatiales et offre le juste niveau de fonctionnalités pour satisfaire à la fois les professionnels SIG expérimentés et les utilisateurs débutants.

Utilisé aussi bien comme outil autonome de gestion des données spatiales que comme élément intégral d'un SIG à l'échelle de l'entreprise, Global Mapper est indispensable pour quiconque travaille avec des cartes ou des données spatiales.

- SIG économique et facile à utiliser
- Supporte plus de 250 formats de données spatiales
- Module LiDAR optionnel pour un traitement puissant des nuages de points
- Gestion avancée de la projection à l'aide de la librairie GeoCalc
- Support technique inégalé et gratuit [5].



II.6 Les transformations proposées par les logiciels SIG :

Lors du calage, l'image subit une transformation, afin de faire coïncider au maximum les points de départ avec les coordonnées spécifiées par l'utilisateur. Une transformation est en fait une formule mathématique transformant les coordonnées de départ vers les coordonnées voulues.

Il existe divers types de transformations, adaptées à des usages différents. Chaque transformation, si on l'utilise avec un nombre de points de calage supérieur à son minimum, renverra une erreur correspondant à la différence entre les coordonnées "idéales" voulues par l'utilisateur et les coordonnées effectivement calculées lors de la transformation (erreur résiduelle **Résidu (pixels)** de la table des points d'appui). [6].

➤ **Linéaire (2 points minimum) :**

Type le plus simple, ne déforme pas le raster. Cette transformation est rarement suffisante pour des images scannées.

➤ **Helmert (2 points minimum) :**

Cas particulier de transformation polynomiale d'ordre 1.

➤ **Transformation polynomiale d'ordre 1, ou transformation affine (3 points minimum):**

Elle préserve la colinéarité (3 points alignés le resteront) et permet seulement changement d'échelle, translation et rotation.

➤ **Transformation polynomiale d'ordre 2 (6 points minimum) :**

Permet une distorsion du raster.

➤ **Transformation polynomiale d'ordre 3 (10 points minimum) :**

Le degré de distorsion possible est plus important que pour une transformation d'ordre 2.

➤ **Thin Plate Spline (TPS) (1 point minimum) :**

Méthode récente, permettant de prendre en compte des déformations locales. Cette transformation est utile lorsqu'on dispose d'originaux de très mauvaise qualité.

➤ **Projective (4 points minimum) :**

Une des transformations les plus complexes, qui ne conserve pas le parallélisme. Un carré sera transformé en quadrilatère.

II.7 Les points d'appuis :

Appelé aussi point de contrôle ou point de calage, l'identification d'une série de ses points au sol (coordonnées x, y connues) qui relient des emplacements du jeu de données raster aux emplacements des données référencées spatialement. Les points de contrôle sont des emplacements qui peuvent être identifiés avec précision sur le jeu de données raster et à l'aide de coordonnées du monde réel. Différents types d'entités peuvent être utilisés comme emplacements identifiables (coins bâtis, carrefour, intersection des routes...).

Les points de contrôle, alliés à la transformation, permettent de décaler et de déformer le jeu de données raster par rapport à son emplacement actuel vers l'emplacement correct spatialement.

Le nombre de liens que nous devons créer dépend de la complexité de la transformation que nous envisageons d'utiliser pour transformer le jeu de données raster en coordonnées cartographiques. [7].

III. Cadre pratique :

Pour géoréférencer les cartes des paramètres de la nappe du plateau de Mostaganem dépourvus de quadrillage de coordonnées et d'un système de projection définie, tout en considérant l'ancienneté du support papier, nous a obligé à choisir des méthodes et des techniques de géoréférencement adéquat afin de surmonter ces problèmes et d'avoir un géoréférencement fiable.

III.1 Les méthodes de géoréférencement utilisée :

Pour trouver la solution optimale pour ce cas d'étude, nous avons décidé d'appliquer la méthode la plus appropriée, en respectant les spécificités de chacune.

- **La première méthode** (le géoréférencement absolue) est inapplicable suite à l'absence de la condition essentielle la disponibilité des coordonnées (les cartes de Gauchez). Cependant cette méthode est appliquée sur la carte de référence (Carte hydrogéologique) suite à la présence du quadrillage des coordonnées.
- **La méthode de Google Earth** pourrait convenir dans une certaine mesure, mais elle ne donne des résultats que si les mêmes points de référence peuvent être identifiés avec précision sur les deux cartes, ce qui est difficile dans notre cas compte tenu de l'état des cartes à géoréférencé.
- **La troisième méthode** (le géoréférencement relatif) requiert une carte de référence, ce qui est le cas, Lors de notre stage pratique au niveau du centre des techniques spatiales (CTS), nous avons pu obtenir une carte de la même zone d'étude contenant des éléments communs (oued Chélif, la côte, les formations géologiques) et surtout des coordonnées, ce qui rend cette méthode optimale.

III.2 Description de document de référence :

C'est une carte hydrogéologique réalisée par DEMRH en 1974 du plateau de Mostaganem, elle contient une légende géologique, un carroyage des coordonnées dans le système de projection Lambert conforme conique Algérie, et elle a été le support (carte de référence) du point de départ pour géoréférencer les différentes cartes des paramètres de la nappe du plateau. Notre choix s'est fixé sur cette carte car elle contient des éléments permanents qui nous aident à identifier des points de calage avec précision.

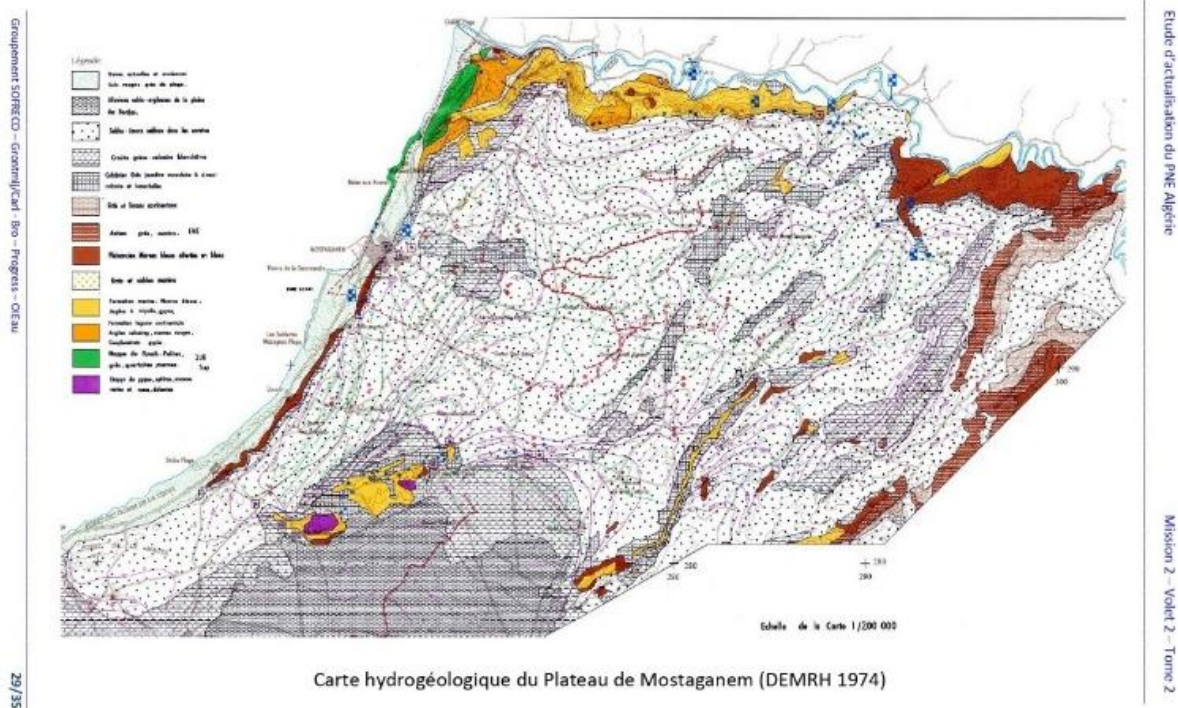


Figure 2- 8 : Carte hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (DEMRH 1974).

III.3 Application de la méthode de géoréférencement relatif :

III.3.1 Logiciel utilisé :

Nous avons choisi Map info, Comme il est indiqué précédemment dans la présentation du logiciel pour sa simplicité d'utilisation et sa légèreté. Il ne nécessite aucun réglage, il sélectionne par défaut les options les plus adaptées pour des résultats optimaux et offre également des possibilités de personnalisation.

III.3.2 Choix du système de projection :

Après une première analyse, il apparaît clairement que le système de coordonnées est le Lambert conforme conique Algérie, par conséquent, pour maintenir la forme géométrique de la carte de référence, il a fallu se référer à ce système de projection.

Une fois les résultats de géoréférencement correcte sont confirmés, nous avons converti le système de coordonnées local **Lambert conforme conique** en un système de coordonnées global Universel Transverse Mercator (WGS84) pour plusieurs raisons notamment les suivantes :

- Pour éviter les décalages de position, car quand on superpose les cartes avec la projection Lambert sur un fond de carte moderne (Google Maps, images satellitaire, GPS) nous observerons un décalage. L'objectif est de s'assurer que notre point à Mostaganem tombe exactement là où il se trouve réellement sur le terrain.
- Pour éviter l'incompatibilité avec les outils de technologie actuelles (GPS & GNSS) c'est à dire, en utilisant des coordonnées Lambert directement dans les outils du logiciel rend la navigation totalement fausse donc on s'assure de l'intégrer dans un langage universel.
- Eviter la distorsion de calcul pour les distances et les surfaces parce que la projection Lambert est utile pour de large zones exemple une zone d'est en ouest, mais l'UTM est précise pour les zones découpées en fuseaux (la zone d'étude se trouvant au **fuseau 31**).
- Enfin pour éviter l'isolement des données car la majorité des bases de données nationales et internationales convergent vers le système UTM(WGS84) du coup l'exploitation de notre base de données sera plus large.

Nous avons utilisé le logiciel Global Mapper pour convertir le système de coordonnées Lambert en UTM, en effectuant une double transformation passant par le système de coordonnées géographique. Ce passage est obligatoire parce que la projection Lambert et UTM sont deux façons différentes de la sphère terrestre pour la mettre à plat.

- Le Lambert utilise un cône (ellipsoïde Clark 1880.)
- L'UTM utilise un cylindre (WGS84.)

Le passage par les coordonnées géographique est le pont obligatoire pour changer à la fois de forme de projection (Cône vers Cylindre) et de modèle d'ellipsoïde (Clark 1880 vers WGS84).

Les autres cartes des différents paramètres ont été travaillées en utilisant le géoréférencement relatif à la carte de référence (carte hydrogéologique).

La figure montre comment un système de projection influence la superposition de deux couches de la même région (la carte qui contient des courbes avec le système de projection Lambert et la couche au-dessous d'elle avec le système de projection UTM).

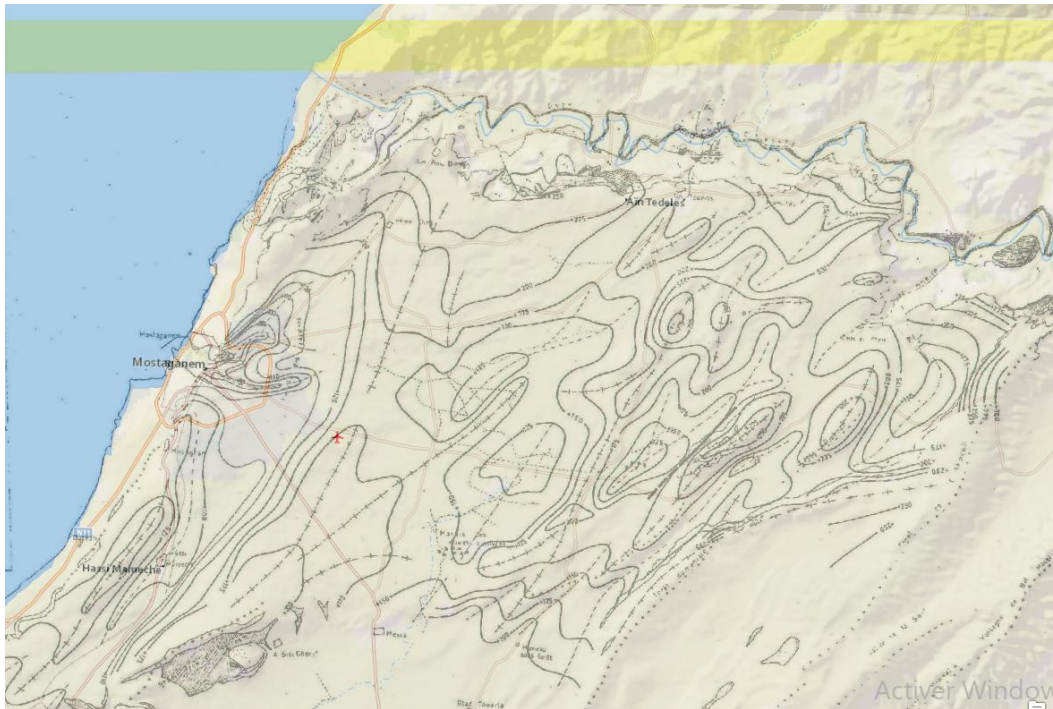


Figure 2- 9 : Superposition de deux couches avec différents systèmes de projection.

Cependant la figure suivante confirme que lorsque deux couches ont un même système de projection, alors les repères se superposent parfaitement.



Figure 2- 10 : Superposition de deux couches avec le même système projection.

III.3.3 Le choix de transformation :

La transformation polynomiale utilise une fonction polynomiale axée sur des points de contrôle et un algorithme LSF (Least Square Fitting). Elle est optimisée pour une précision globale, mais ne garantit pas une précision locale.

L'objectif de l'algorithme LSF est d'obtenir une formule générale applicable à tous les points, généralement aux dépens d'un léger mouvement des positions d'arrivée des points de contrôle. Le nombre de points de contrôle non corrélés requis pour cette méthode doit être de 1 pour un décalage d'ordre zéro, de 3 pour un premier ordre (affine), de 6 pour un deuxième ordre et de 10 pour un troisième ordre.

La transformation polynomiale de premier ordre est fréquemment utilisée pour géoréférencer une image. Utilisez une transformation de premier ordre ou affine pour le déplacement, la mise à l'échelle et la rotation d'un jeu de données raster.[8].

Les 6 paramètres sont a, b, c, d, tx, ty. Chacun joue un rôle précis :

Tableau 2 n° 1 : les paramètres de la transformation.

Paramètre	Rôle	Exemple
tx	Translation en X	Déplace l'image vers la droite /gauche
ty	Translation en Y	Déplace l'image vers le haut/bas
a,d	Mise à l'échelle	Zoom en X et en Y
b, c	Rotation et cisaillement	Fait pivoter et incline la grille

Avec un minimum de trois points de contrôle, l'équation mathématique utilisée lors d'une transformation de premier ordre peut exactement transposer chaque point du raster sur l'emplacement cible. Un nombre de points de contrôle supérieur à trois introduit des erreurs, ou résidus, qui sont distribués sur tous les points de contrôle.

Toutefois, il est recommandé d'ajouter plus de trois points de contrôle, car si le positionnement de l'un d'entre eux est incorrect, l'impact sur la transformation est beaucoup plus important. Ainsi, même si l'erreur de transformation mathématique peut augmenter avec la création de liens supplémentaires, la précision générale de la transformation augmente également.

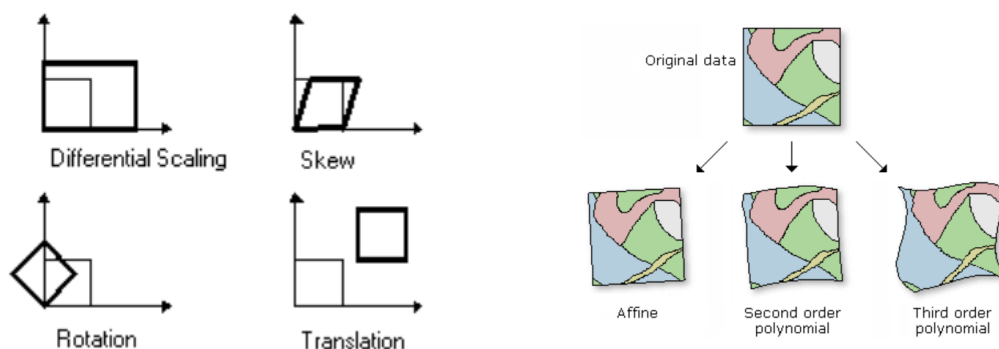


Figure 2- 11 : Paramètres de transformation affine.

III.3.4 Choix des points d'appui :

Après avoir déterminé le système de projection et la transformation appropriée, l'étape suivante consiste à déterminer les points d'appui et à faire les choix adéquats. Il est nécessaire de choisir les éléments constants dans les deux cartes par exemple : Des apex de méandres de l'oued Chélif, Des points de repère de côte, des repères lithologiques invariables (formation géologique).

On prend au minimum trois point selon la norme mais la plus standard c'est quatre points Pour la localisation de ces points elles doivent être dans les quatre coins de la carte on justifiant cette répartition pour des raisons liés à la géométrie et d'autres pour raisons mathématique :

- Pour stabiliser le modèle, le géoréférencement utilise des équations mathématiques pour passer des coordonnées image (pixel x,y) vers coordonnées réelles (Lambert, wgs84), quand nous plaçons les points dans les quatre coins, nous forçons l'algorithme à stabiliser et cadrer la zone d'étude.
- Pour contrôler la distorsion géométrique, tant que le support papier scanné est ancien, automatiquement il a dû subir des distorsions (étirement du papier, inclinaison lors du scan), l'emplacement de ces points aux coins de la carte permet au logiciel de détecter et de corriger l'inclinaison et rotation autour des deux axes x et y.

La bonne répartition des points d'appui est le résultat de superposition parfait avec la carte de référence. La figure ci-dessous montre que la bonne répartition des points de calage sur les quatre coins aide à avoir une superposition avec la carte de référence.

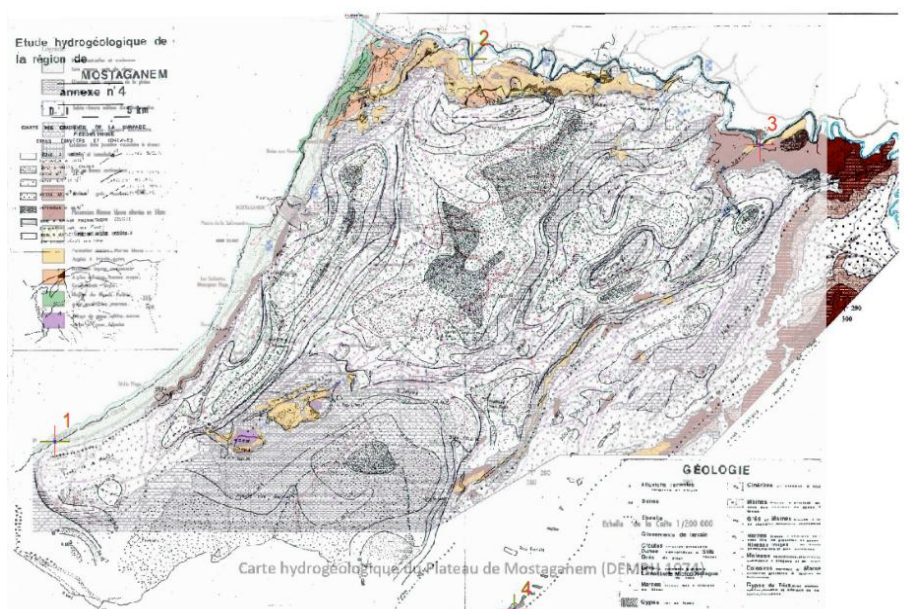


Figure 2- 12 : Répartition de points de calage sur les quatre coins.

Par contre cette figure montre la distorsion de la couche géoréférrencée par rapport à la couche de référence suite au mauvaise destrubition des points de calage.

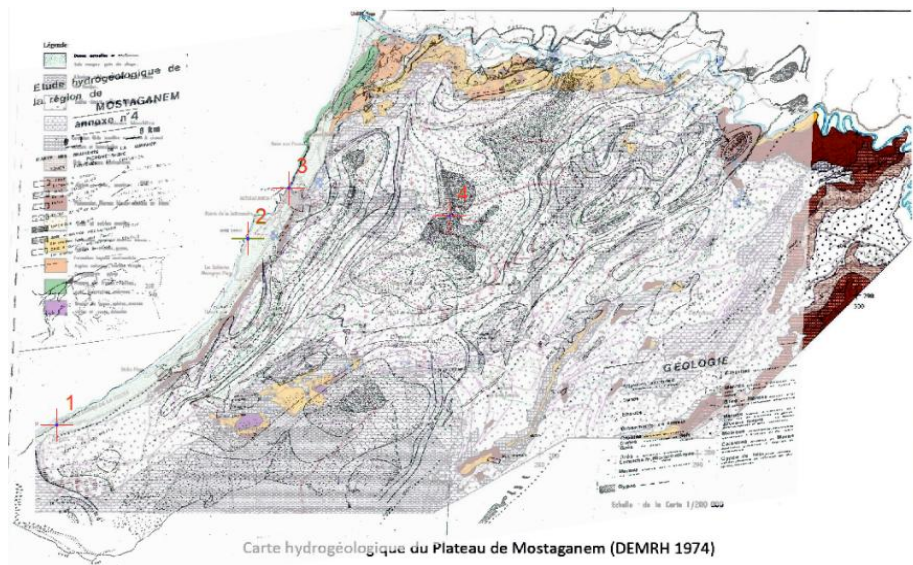


Figure 2- 13: Distorsion de la carte après géoréférencement.

III.4 Discussion des résultats du géoréférencement :

Pour éprouver le degré de fiabilité des résultats obtenus, on s'appuie sur plusieurs indices de validation, parmi ceux-ci : la valeur d'erreur moyenne quadratique ou Root Means Square (RMS) qui est exprimée en pixel ou en mètre. Le cas de Map info est exprimé en pixel, nous dirons que le géoréférencement est excellent quand l'erreur de pixel est de 0, il reste acceptable si elle ne dépasse pas le décalage de 1 pixel (la taille de pixel dans notre carte égale à 17 mètres) dans le cas des études hydrogéologiques, ce décalage n'est pas dramatique. En plus le support papier est ancien et scanné, donc l'obtention de ces résultats est tout à fait acceptable.

Pour le support de référence (la carte hydrogéologique) le résultat de géoréférencement est excellent $RMS = 0$ pixel. La figure suivante montre les valeurs :

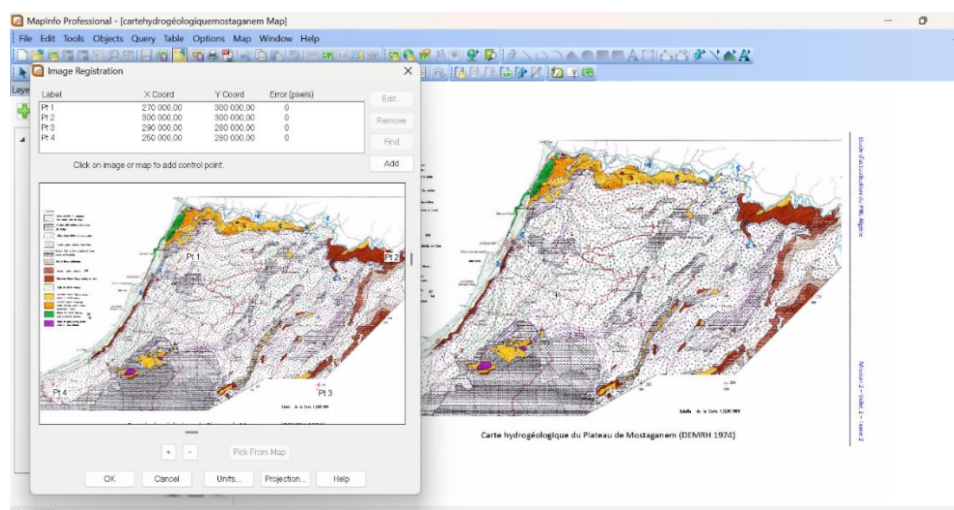


Figure 2- 14 : Valeur de RMS de la carte hydrogéologique.

Pour le reste des cartes, on a obtenu des valeurs différentes suite à l'état de la carte. Dans l'ensemble, on n'a pas dépassé le décalage de 1 Pixel la figure suivante illustre un exemple de valeurs obtenues :

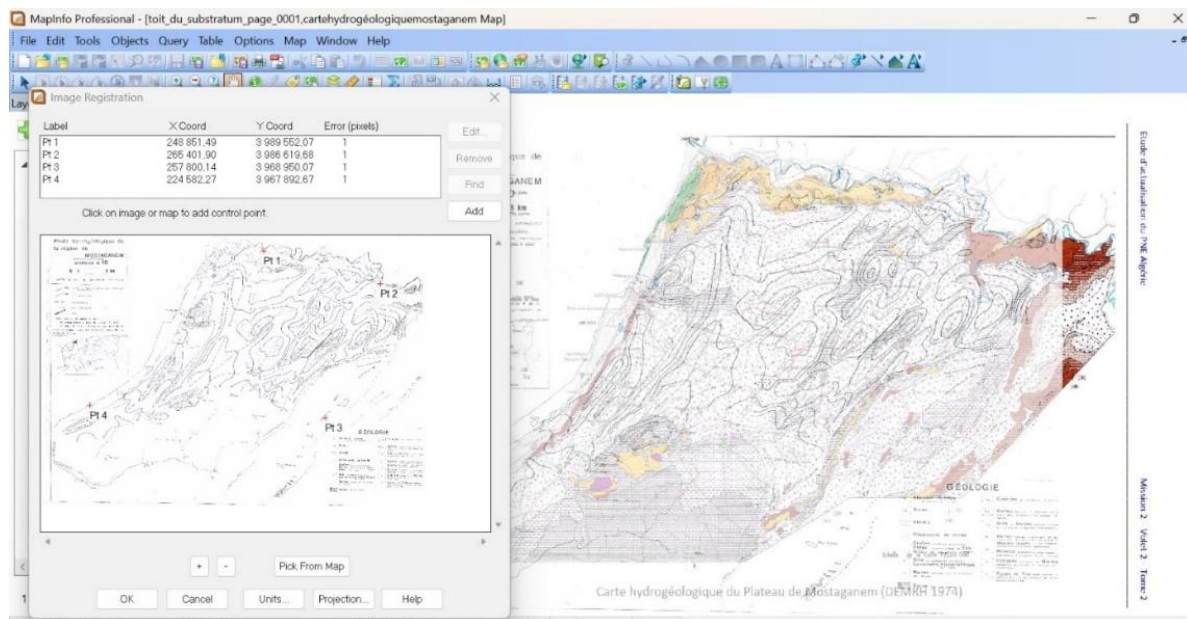


Figure 2- 15 : Valeur de RMS carte du toit du substratum.

IV. Conclusion :

L'étape de géoréférencement est une étape clé dans la numérisation et l'amélioration des données cartographiques anciennes. Face aux contraintes imposées par l'état des cartes à traiter (absence de quadrillage de coordonnées et ancienneté du papier et système de projection non défini) la méthode de géoréférencement relatif s'est avérée la plus appropriée pour ce cas d'étude.

En prenant comme carte de référence la carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem produite par le DEMRH en 1974 et en appliquant une transformation polynomiale du premier ordre (transformation affine) avec des points de calage nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec des erreurs RMS inférieures à un pixel ce qui est parfaitement acceptable pour les études hydrogéologiques.

La conversion du système de projection Lambert au système UTM (WGS84) a permis de garantir que nos données soient compatibles avec les outils et bases de données géospatiales modernes assurant ainsi leur utilisation optimale dans les analyses ultérieures.

Chapitre 3 :

Outils et Méthodes

I. Introduction :

Les cartes sont un langage universel pour les géographes et les scientifiques, toutefois pour exploiter les informations de ces cartes dans un environnement numérique moderne elles doivent être converties vers des données vectorielles structurées et organisées. Cette étape est le travail de la numérisation effectuée sur les onze cartes disponibles et la construction de la base de données des éléments associés.

II. Définitions :

II.1 Système d'information géographique « SIG » :

Un SIG est une technologie servant à créer, gérer, analyser et cartographier tout type de données. Le SIG associe les données à une carte et intègre des données de localisation (endroit où se trouvent les choses) à toutes sortes d'informations descriptives (état des choses à cet endroit). Il constitue ainsi un socle pour la cartographie et l'analyse dans le domaine des sciences et dans presque tous les secteurs. Le SIG aide les utilisateurs à comprendre les modèles, les relations et le contexte géographique des données. Ses avantages sont nombreux et incluent notamment une amélioration de la communication, de l'efficacité, de la gestion et de la prise de décision. [1].



Figure 3- 1: Les composantes d'un système d'information géographique SIG. [2].

Un SIG répond à 5 fonctionnalités (les 5 A) :

- Abstraction : modélisation de l'information,
- Acquisition : récupérer l'information existante, alimenter le système en données,
- Archivage : stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement,
- Analyse : réponses aux requêtes, cœur même du SIG,
- Affichage : restitution graphique. En d'autres termes, un SIG est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée. (SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE COURSET TRAVAUX PRATIQUE-université Tlemcen).

Démarche d'application :

Un SIG stocke les informations concernant le monde sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par leurs coordonnées géographiques.

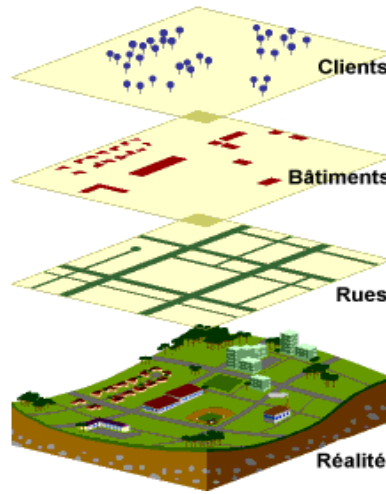


Figure 3- 2 : La superposition des couches thématiques, [3].

II.2 L'information géographique :**II.2.1 Les données géographiques :**

Les données géographiques sont des données localisées à la surface terrestre. Elles sont la base du SIG, et le support pour positionner d'autres objets. (D'autres données et / ou le référentiel permettent aussi de positionner d'autres objets).

II.2.2 La donnée « raster » :

C'est une donnée où l'espace est divisé de manière régulière en ligne et en colonne ; à chaque valeur ligne / colonne (pixel) sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace, comme :

- Photo scannée ou carte scannée (le cas des cartes des paramètres de la nappe de Mostaganem)
- Photo aérienne
- Image satellitaire
- Image satellitaire radar

II.2.3 La donnée « vecteur » :

Pour représenter les objets à la surface du globe, les SIG utilisent trois objets géométriques qui sont le point, la ligne et la surface.

II.2.4 La donnée alphanumérique :

La donnée alphanumérique ou attributaire ou sémantique, est une information textuelle, qualitative ou quantitative. Elle décrit l'objet géométrique.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) à chaque couple x et y est associé un z ce qui permet de créer un « squelette » du relief sur lequel on peut draper des images satellites ou des photos aériennes où les objets du sursol, maisons, arbres, ... seront plats. ([Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG- territoire numérique](#)).

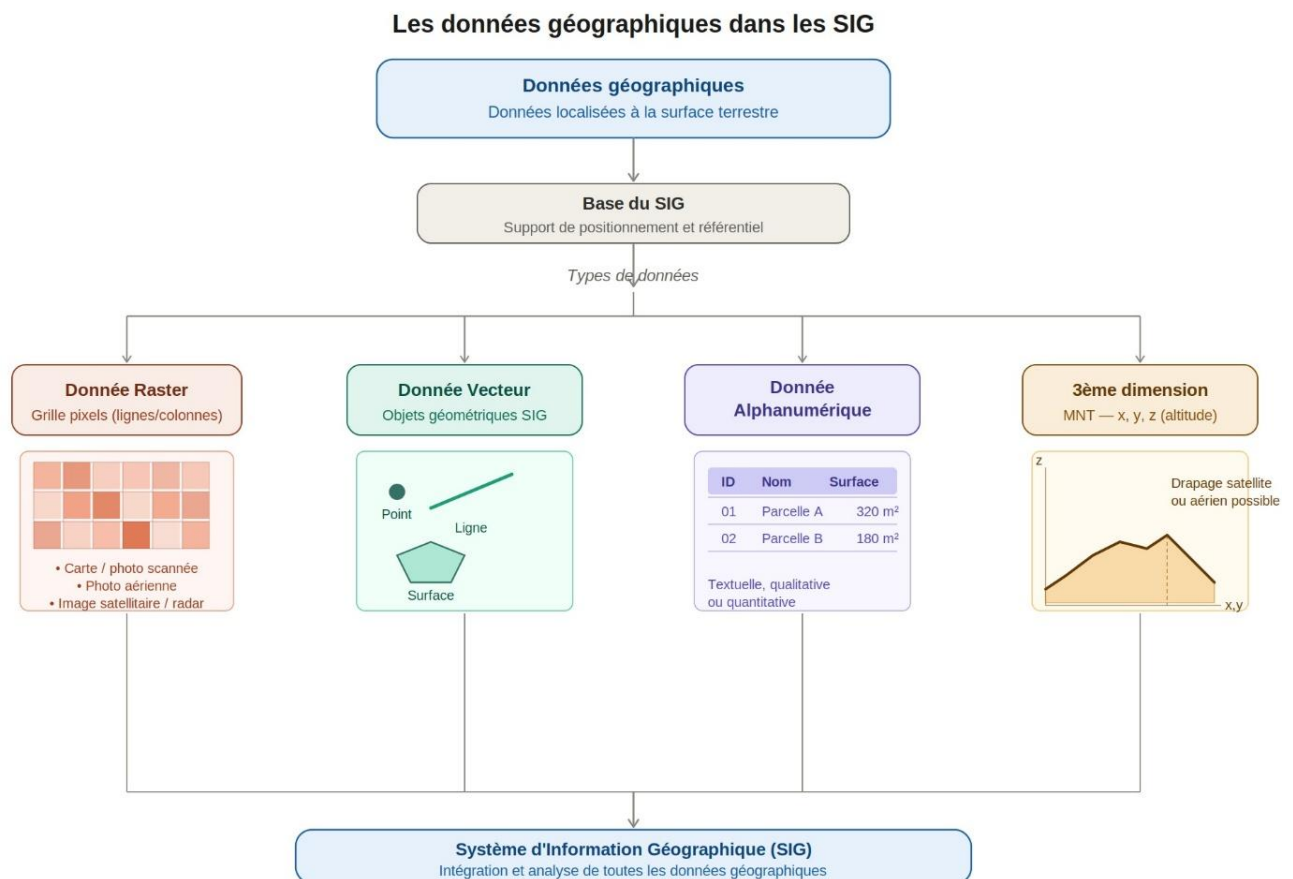


Figure 3- 3 : Organigramme de traitement des données dans un SIG.

III. Base de données :

Une Base de données est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données). Une base de données se traduit physiquement par un ensemble de fichiers sur disque.

Voici maintenant une présentation des trois types de GéoDatabase :

- La GéoDatabase Fichier stocke les ensembles de données dans un dossier Windows. Chaque ensemble de données peut « peser » jusqu'à 1To. Cette base de données peut être cryptée et sécurisée. C'est la GéoDatabase la plus souple d'emploi.
- La GéoDatabase personnelle stocke les données dans une base de données Access (.MDB). La taille maximale de cette base de données est de 250 à 500 Mo et elle ne peut être utilisée que dans l'environnement Microsoft Windows.
- La GéoDatabase ARCSDE stocke les données dans des bases de données externes et beaucoup plus lourdes à gérer mais aussi plus performantes comme Oracle, DB2, SQL Server, etc.

Les GéoDatabases peuvent contenir des Classes d'entités (Feature class), des jeux de classes d'entités (Feature dataset), des classes d'objets (Object class) aussi appelées Tables ainsi que des fichiers Raster.

Une classe d'entités est un ensemble homogène d'entités. Toutes les entités ont la même géométrie (point, polyligne, polygone,) et les mêmes attributs. Ces attributs sont stockés dans la table de la classe d'entités. La notion de classe d'entités est similaire à la notion de fichier de formes (Shapefile).

Un jeu de classes d'entités est un ensemble de classes d'entités. Il regroupe des classes d'entités ayant des relations topologiques. Un jeu de classes d'entités peut aussi être utilisé pour regrouper des classes d'entités appartenant à une même thématique. Toutes les classes d'entités appartenant à un même jeu de classes d'entités sont stockées avec la même référence spatiale (datum, projection, domaines,). La notion de jeu de classes d'entités est similaire à la notion de couverture.

Une table peut être stockée dans une GéoDatabase. Elle se caractérise par un ensemble de champs et d'enregistrements. Les tables d'une GéoDatabase peuvent être reliées ou jointes à des tables ou à des classes d'entités de la même GéoDatabase.

Les fichiers Raster peuvent être stockés dans une GéoDatabase. Ils peuvent être mosaïqués en un seul jeu de Raster ou gérés comme un ensemble de fichiers différents dans un catalogue d'images.

Les relations, les domaines, les sous-types, les réseaux géométriques, les métadonnées et les références spatiales des couches sont aussi stockés dans la GeoDatabase. ([LES GEODATABASES DANS ARCGIS- Philippe LÉPINARD](#)).

III.1 Présentation de logiciel ArcGIS :

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau. [4].



Figure 3- 4 : Accessibilité pour ArcGIS.

III.2 Fonctionnalité de logiciel ArcGIS :

ArcGIS nous permet de :

- Créer, partager et utiliser des cartes intelligentes
- Rassembler les informations géographiques
- Créer et gérer des bases de données géographiques
- Résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale
- Créer des applications basées sur la carte
- Communiquer et partager des informations grâce à la puissance de la géographie et de la visualisation.[4].

IV. Cas d'étude :

Après le géoréférencement des anciennes cartes vient l'étape de la **numérisation manuelle** des cartes **raster** géoréférencées.

Le processus de numérisation comprend trois étapes principales. La première consiste à créer des tables et à numériser chaque carte individuellement. Une fois cette première étape terminée, la suivante consiste à convertir les fichiers de sortie MapInfo (fichier table .tab) en format Shapefile (.shp) à l'aide de logiciel Global Mapper, pour enfin passer à la structuration et création de la base de données sur arcgis.

Nous avons exécuté l'étape de numérisation manuelle par le logiciel Map info, suite à la facilité de manipulation (le zoom, le déplacement avec le curseur, la simplicité de crée des tables).

La première étape sert à afficher la carte géoréférencée sur le logiciel, par la suite on passe à la création d'une nouvelle table (couche) pour la carte affichée, la méthode de création est de procéder à partir de la commande « fichier/ nouvelle table », ensuite le menu de « new table structure » de la nouvelle table

Par la suite il faut choisir le système de projection de la couche par le bouton « projection », la couche créée porte un nom, on définit ainsi les données associées à cette couche (nombre de champs leur caractéristiques (chaque carte à ces propres attributs ex : courbes (poly line), puits (point), forage (points)...).

L'étape suivante sert à entamer la digitalisation des cartes après avoir superposé la couche créée et la carte géoréférencée, et en même temps en affectant les valeurs de chaque attribut dans son propre champ.

Dès que nous terminons toute la carte, nous sauvegardons notre travail de numérisation par le bouton enregistrer. Et ainsi de suite pour le reste des cartes, chacune a ces particularités.

Nous continuerons la numérisation de toutes les cartes sur MapInfo, par la suite nous passerons au le logiciel Global Mapper pour convertir les formats de fichier allant de format Table (Tab) MapInfo en format Shapefile (SHP).[Annexes].

La figure qui vient montre l'un des exemples de la digitalisation :

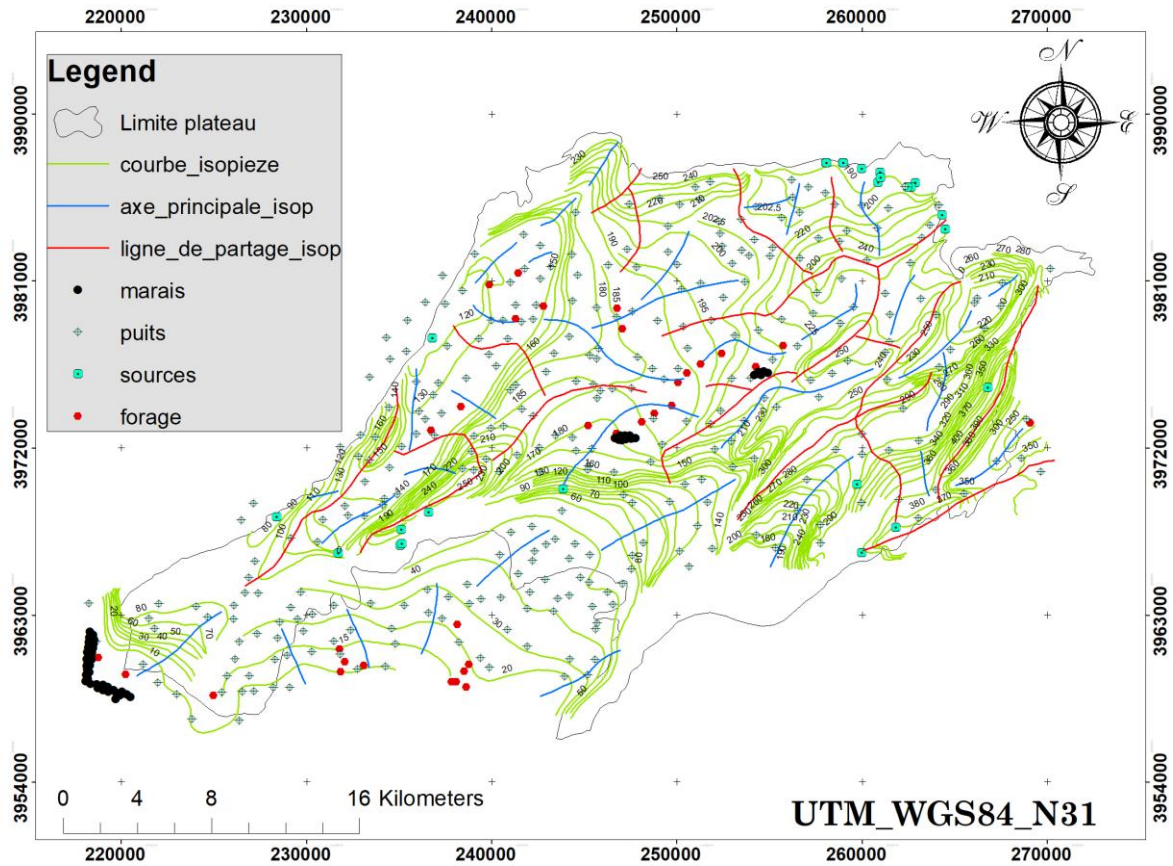


Figure 3- 5 : Résultat de numérisation carte isopieze (ArcGIS).

L'objectif de ce passage est d'aller au logiciel ArcGis afin de structurer notre base de données.

La base de données du travail effectué est de type « GeoDatabase Fichier » pour sa capacité de stockage et sa souplesse, elle porte le nom « système d'information géographique de la nappe du plateau de Mostaganem »

IV.1 Les composantes de la base de données :

IV.1.1 Points d'eau :

Est un point d'accès naturel (source) ou artificiel (forage, drain, puits...) aux eaux souterraines. Il constitue le concept clef à partir duquel des données techniques sont recueillies pour suivre la qualité et la quantité des ressources en eaux souterraines. [5].

La figure ci-dessous présente les différents types des points d'eau qui existe au plateau de Mostaganem (puits, forages, sources, marais, ligne et axe de partage).

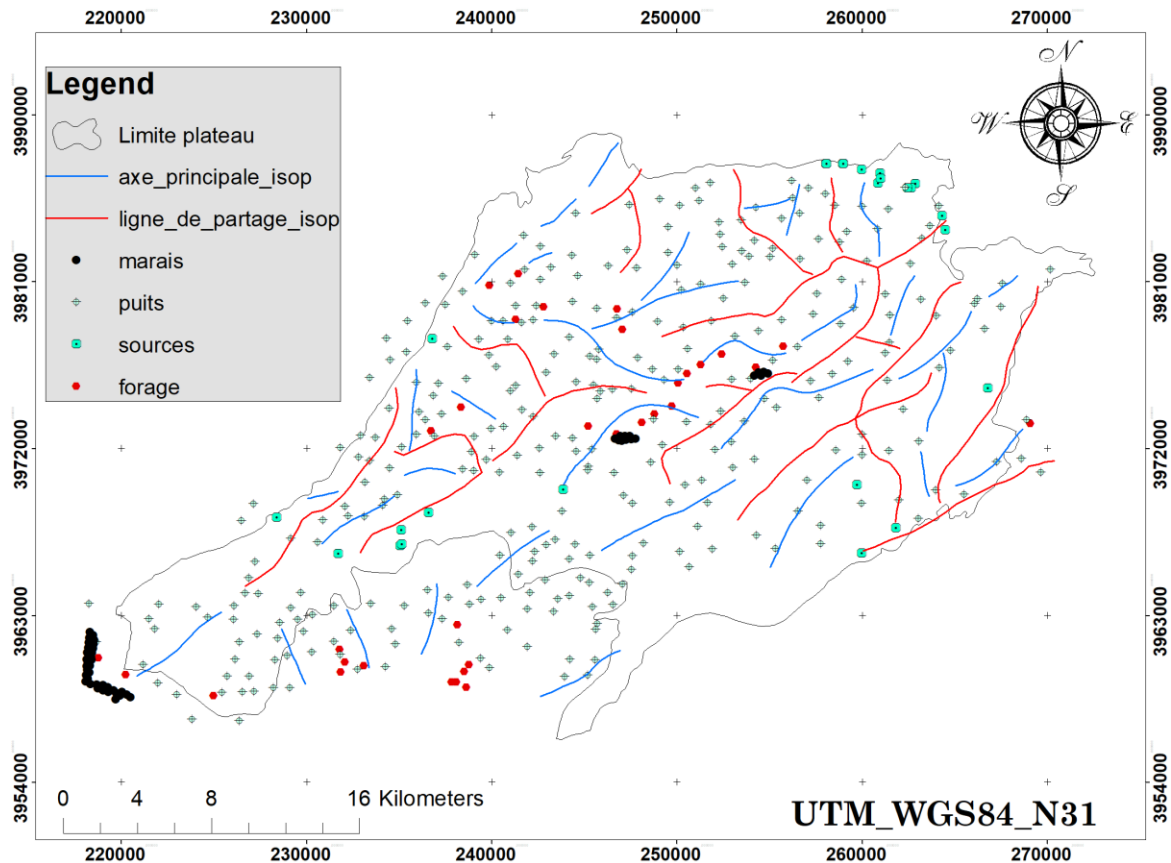


Figure 3- 6 : Résultats de numérisation des points d'eau (ArcGIS).

Les points d'eau numérisée dans cette carte sont les forages (33), les puits (321), les sources (25) et les marais, de plus des axes principaux d'écoulement et les lignes de partage des eaux.

IV.1.2 Réseau hydrologique :

Ensemble des milieux aquatiques (lacs, rivières, eaux souterraines, zones humides, etc.) présents sur un territoire donné, le terme de réseau évoquant explicitement les liens physiques et fonctionnels entre ces milieux. [6].

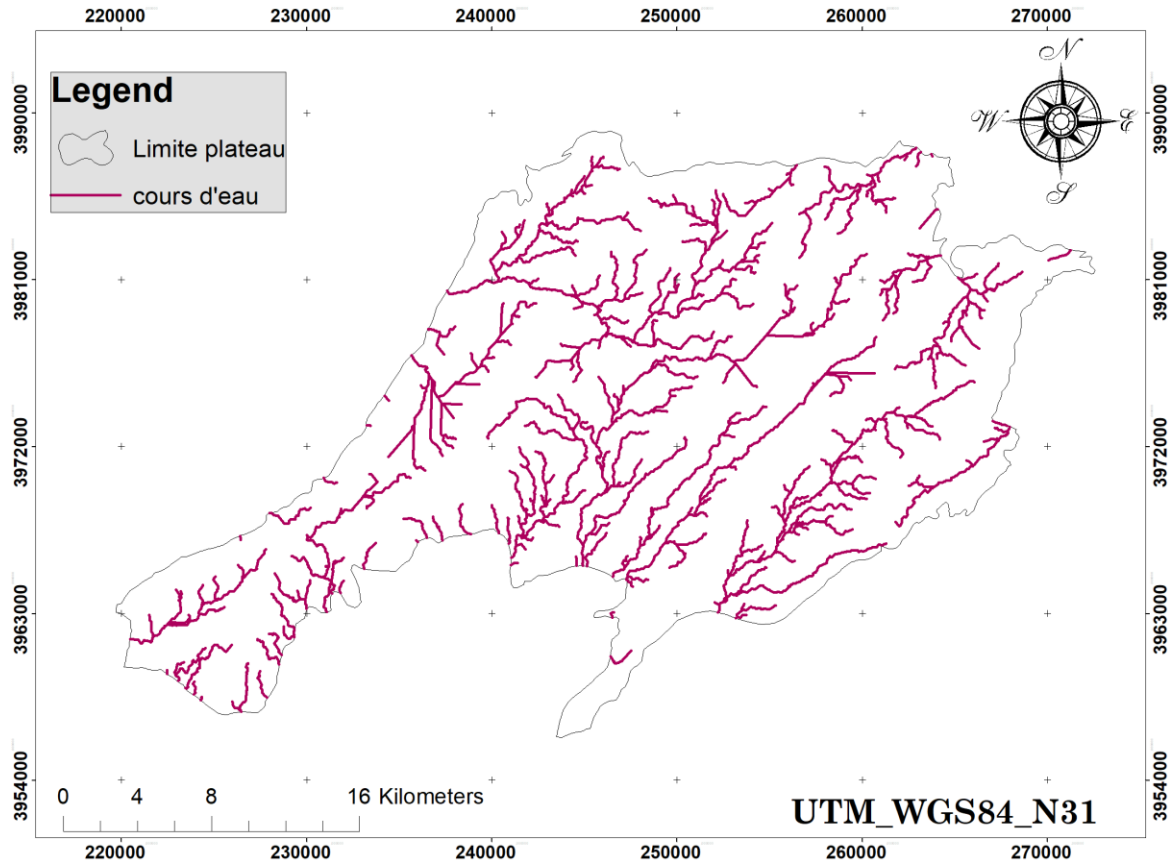


Figure 3- 7 : Résultats de la numérisation des Cours d'eau (ArcGIS).

La carte illustre la densité des cours d'eau au niveau du plateau de Mostaganem, ce qu'est remarquable l'eau a une dynamique intense sur tout la surface du plateau.

IV.1.3 Paramètre hydrodynamique :

Il s'agit d'un paramètre définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir, à permettre son écoulement et à réagir aux propagations d'influence. Les cartes de ces paramètres sont : carte du niveau piézométrie, carte de la transmissivité, carte des hautes eaux, carte de l'étiage, carte du gradient hydraulique. ([Les paramètres hydrodynamiques /définition, SIGES AQUIFERE RHENAN](#))

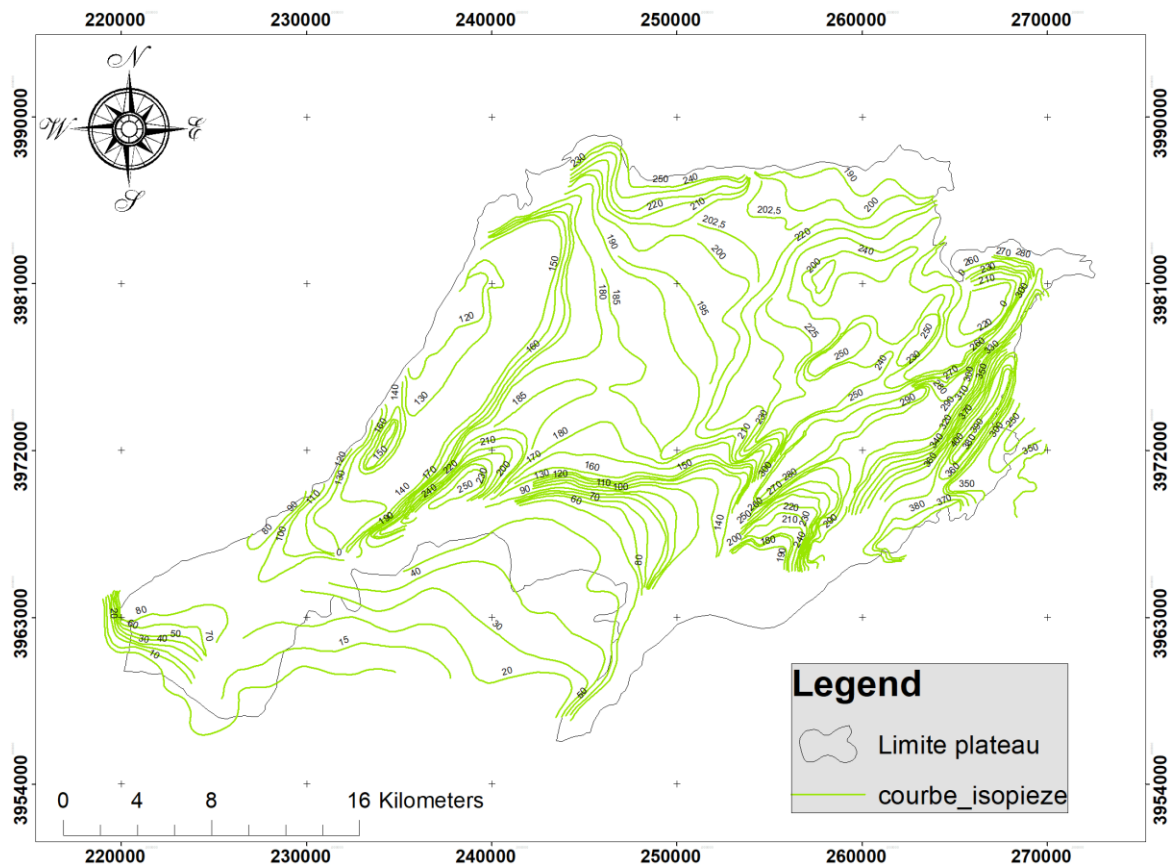


Figure 3- 8 : Résultat de la numérisation des courbes isopièzes (ArcGIS).

Nous remarquerons l'affichage de la couche active sélectionnée (carte isopièze), il s'agit d'un réseau de lignes en isovalues (123 courbes) qui représente les variations du niveau de la surface de la nappe. Ces courbes sont annotées par des valeurs numériques (étiquettes).

IV.1.4 Paramètre de stockage :

Définissent la capacité d'une formation géologique à emmagasiner, retenir et libérer de l'eau. Les cartes sont : carte de toit substratum- carte isobathe.

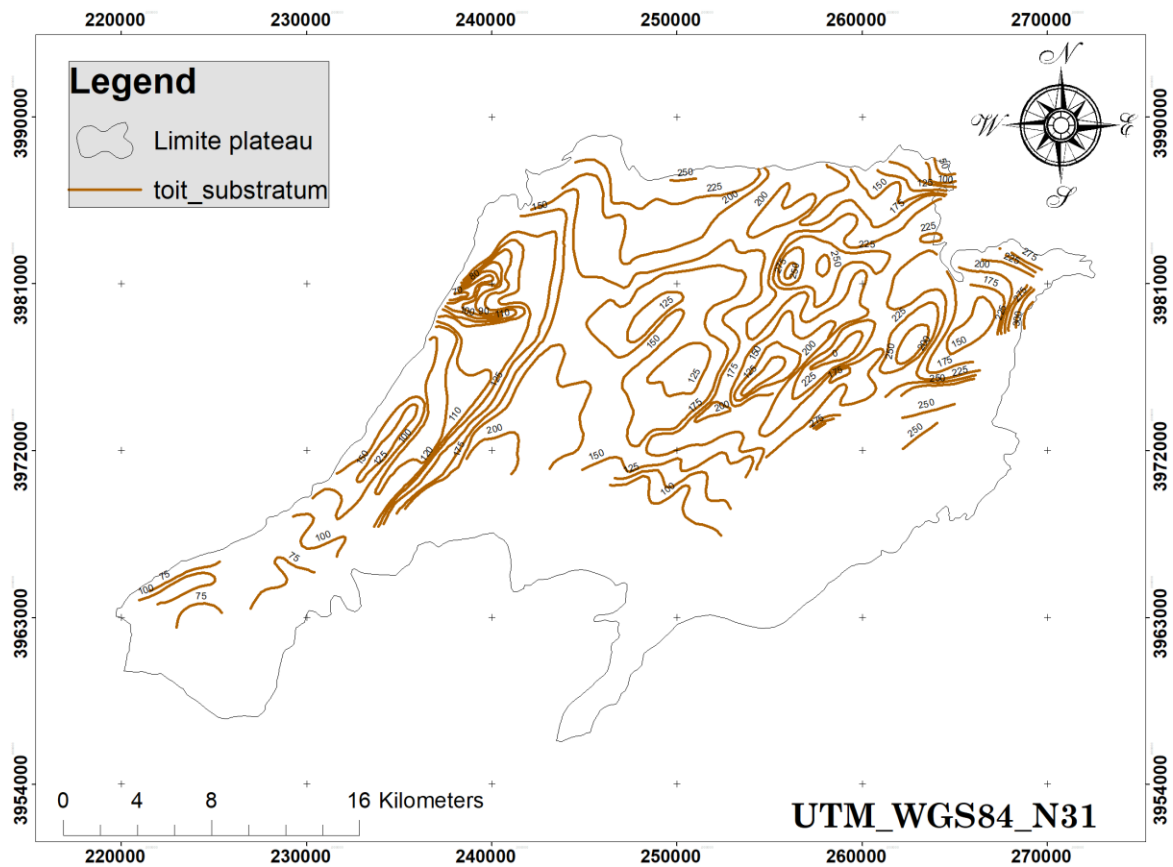


Figure 3- 9 : Résultats de la numérisation du toit du substratum (ArcGIS).

La carte représente le paramètre de stockage toit du substratum dans un quadrillage de coordonnées métriques de la projection UTM/WGS84 de la zone 31N. On remarque le tracé des courbes en isovaleurs qui varient entre 755m et 300m,

IV.1.5 Paramètre hydrochimiques :

L'hydrochimie d'une nappe désigne l'étude de la composition chimique des eaux souterraines et des processus qui influencent la distribution des éléments dissous. Ces paramètres sont essentiels pour déterminer la potabilité, l'aptitude à l'irrigation, et l'origine de l'eau (temps de résidence, interactions roche-eau). ([Caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbas](#))

On a numérisé quatre cartes : carte de conductivité- carte isochlores- carte résides secs et carte isocônes NO_2

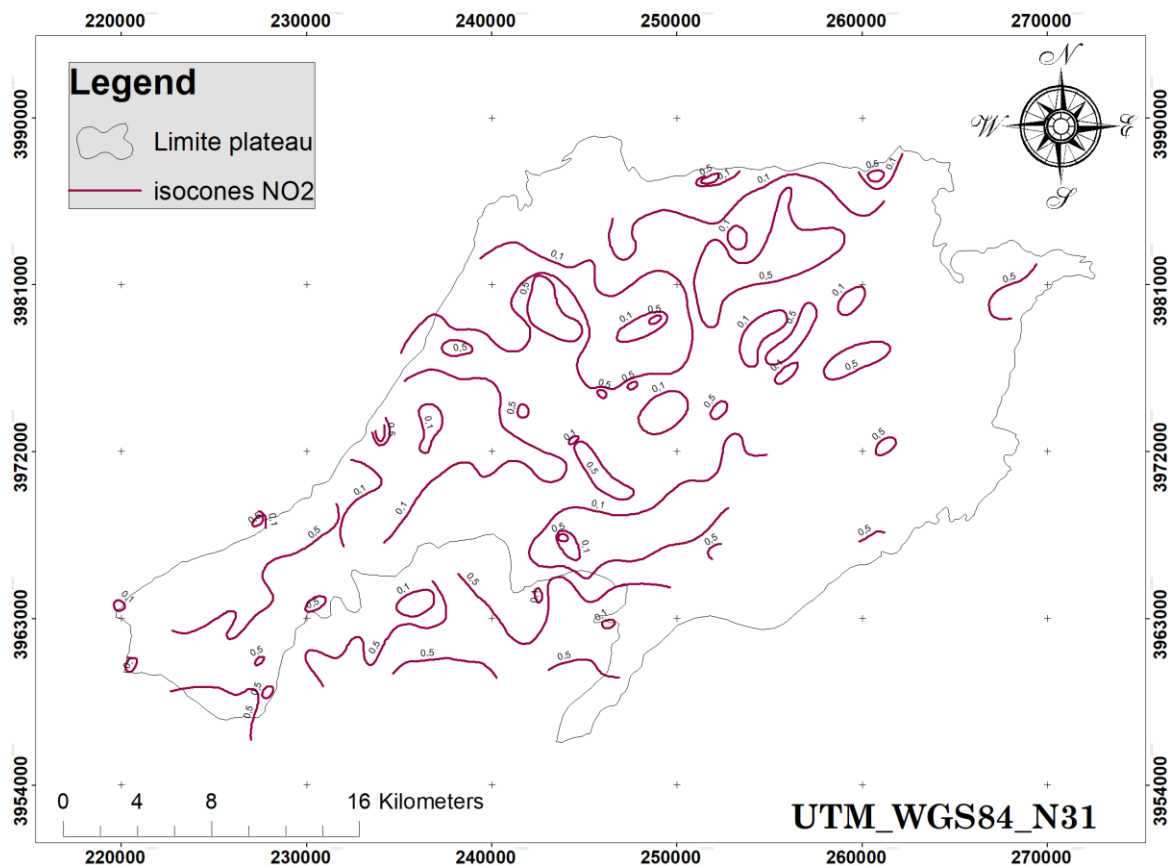


Figure 3- 10 : Résultats de la numérisation de la carte isoconnes NO_2 (ArcGIS).

La carte présente le résultat de numérisation de paramètre hydrochimie (0.1 et 0.5), et le nombre total des courbes numérisées est de 52.

VI. Conclusion :

La numérisation des cartes de la nappe du Plateau de Mostaganem a été bien effectuée, incluant les points d'eau, le réseau hydrologique, les paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques. Toutes ces cartes thématiques ont été structurées dans une Géodatabase avec le logiciel ArcGIS, créant ainsi une base de données exploitable.

Ces résultats constituent la base de la suite de cette étude. En effet, les données vectorielles géoréférencées et numérisées, notamment les courbes isovaleurs et les points d'eau, seront utilisées comme intrants pour l'interpolation spatiale.

Chapitre 4 :

Résultats et Interprétations.

I. Introduction :

Les cartes numérisées se limitaient à des points et des courbes mesurés qui ne couvrent pas toute la zone d'étude de manière continue. L'interpolation spatiale a pour objectif de combler cette lacune et créer des surfaces continues représentant la distribution spatiale de chaque élément sur le plateau de Mostaganem. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation, néanmoins on a choisi celle qui est la plus adaptée pour ce travail.

Ce chapitre met en avant la technique d'interpolation utilisée et les données cartographiques obtenues après la numérisation.

II. L'interpolation :

II.1 Définition de fonction de base radiale (RBF) :

En anglais « Radial Basic Function », c'est une fonction à valeur réelle dont la valeur dépend de la distance par rapport à un point central, souvent appelé centre ou origine. Les RBF sont largement utilisées dans divers domaines, notamment les statistiques, l'analyse de données et la science des données, principalement pour les tâches d'interpolation, d'approximation de fonctions et d'apprentissage automatique. [1].

II.2 Types de fonctions de base radiale :

Les fonctions de base radiale (RBF) sont une série de techniques d'interpolation précises. On compte cinq fonctions de base différentes :

- Spline de plaque mince,
- Spline avec tension,
- Spline entièrement régularisée,
- Fonction multiquadratique,
- Fonction multiquadratique inverse.[2].

II.3 Utilisation des fonctions de base radiale :

Les fonctions de base radiales sont largement utilisées dans diverses applications, notamment l'apprentissage automatique, l'interpolation de données et l'ajustement de surface. Les RBF fournissent un outil puissant pour estimer les valeurs à des points non mesurés en fonction de points de données connus, ce qui les rend inestimables dans des domaines tels que la géostatistique et l'analyse spatiale. [3].

Les fonctions de base radiale permettent de produire des surfaces lisses à partir d'un grand nombre de points de données. Elles produisent de bons résultats pour les surfaces variant doucement, telles que l'élévation. [2].

II.4 Avantage fonctions de base radiale :

L'un des principaux avantages de l'utilisation des fonctions de base radiales est leur capacité à gérer efficacement les données non linéaires. De plus, les RBF sont efficaces en termes de calcul, en particulier lorsqu'elles sont implémentées dans des réseaux RBF, ce qui permet des temps de formation et d'inférence rapides. Leur nature localisée signifie également qu'elles peuvent fournir des prédictions précises même dans des scénarii de données éparses. [3].

II.5 Défis et limite des fonctions à base radiale :

L'un des principaux défis est la sélection des paramètres de centre et de largeur appropriés, qui peuvent grandement influencer les performances du modèle RBF. De plus, les RBF peuvent souffrir de la malédiction de la dimensionnalité, où les performances se dégradent à mesure que le nombre de dimensions augmente. [3].

III. Cas d'étude :

III.1 Justification de choix de la fonction de base radiale (RBF) :

La numérisation des cartes des paramètres de la nappe du plateau a permis des représentations spatiales. Donc, Nous avons appliqué la méthode de l'interpolation de fonction de base radiale suite à la nature des données déjà numérisées qui variait de manière progressive et continue dans l'espace.

La RBF est la plus adapté parce qu'elle génère des surfaces lisses à partir des données non linéaire (le point fort de la RBF est d'engendrer des données non-linéaires comme les courbes, les forages, les puits répandues...), tout en respectant le comportement naturel de la variation de la donnée.

III.2 Choix de type de la RBF :

Nous avons opté pour la fonction RBF Muliquadratique, cette méthode a été introduite par Hardy L.D (1971), d'après lui la formulation et les paramètres de cette méthode offre une capacité à capturer des variations à longue portée, ce qui est important pour ce cas d'étude (une nappe souterraine qui s'étend sur une grande surface. ([Hardy, R.L 1971](#))).

III.3 Exécution de la RBF sur ArcGIS :

La première étape consiste à afficher sur le logiciel la couche des courbes de la carte afin de mettre en œuvre le processus d'interpolation, après l'affichage directement nous avons converti les polygones en points espacés de 500 m (pour ne pas avoir une surface trop lisse) à l'aide d'une fonction du programme ArcGIS (Arctools box).

Avant de commencer l'interpolation on a découpé les différentes couches de données selon la limite de la zone d'étude (clip). Par la suite, on est parti chercher dans ArcGIS « Géostatistique analyse », afin d'interpoler les données.

Par la suite nous avons réglé des paramètres comme le paramètre de Kernel (pour le lissage de la surface et sa continuité) à **100**, et celui du nombre de secteur à **8 secteurs** (pour stabiliser la

carte devant une mauvaise répartition de points de mesure), pour le reste des paramètres nous les laissons par défaut.

Avant de finaliser et visualiser les résultats de l'interpolation, nous devons valider les résultats de ce processus à travers la « cross validation » ou validation croisée.

III.4 Discussion des résultats d'interpolation fonction de base radiale :

Les paramètres qui s'affichent dans la fenêtre cross validation sont importantes pour évaluer à quel point nos résultats sont viables, ces paramètres sont :

III.4.1 Erreur moyenne (ME) :

C'est la vérification de biais du modèle, il calcule la moyenne de tous les résidus. (Plus c'est proche de zéro plus c'est idéal). [4].

III.4.2 Erreur absolue moyenne (MAE) :

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts. C'est à dire elle mesure la distance moyenne entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées (réelles) sans prendre en compte le sens de l'erreur. (Plus c'est proche de zéro plus c'est idéal).[5].

III.4.3 L'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

L'erreur quadratique moyenne est définie comme la mesure des différences entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs réellement observées. (Plus c'est proche de zéro plus c'est idéal).[6].

III.4.4 La droite de régression (R^2) :

Par définition c'est la droite qu'on peut tracer dans le nuage de points qui représente le mieux la distribution à deux caractères étudiée (la valeur idéale est proche de 1). [7].

C'est-à-dire, la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, doit être proche de la valeur idéal 1.

IV. Les résultats de l'interpolation :

Le résultat de l'interpolation et les valeurs des paramètres obtenu par la fonction de base radiale (RBF) selon la limite du plateau est illustré dans les figures suivantes :

IV.1 La carte d'étiage :

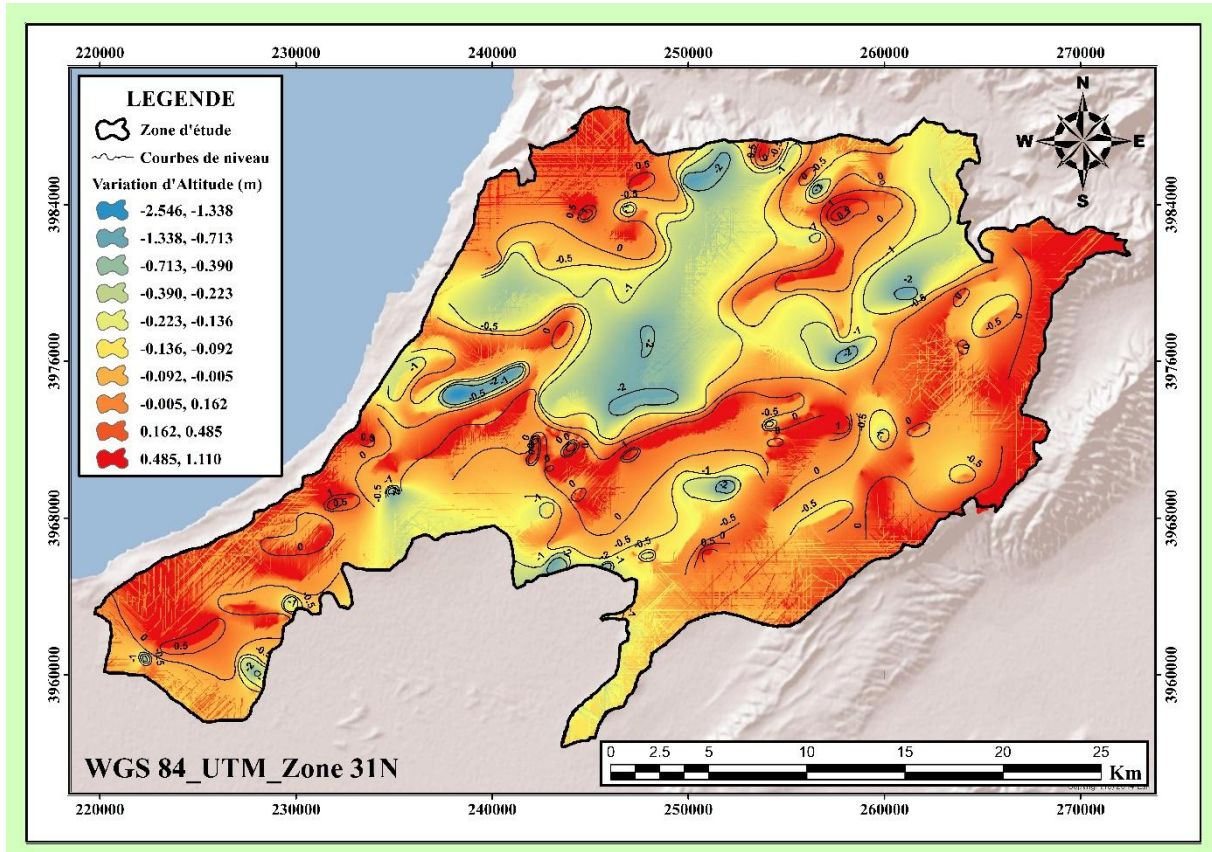


Figure 4- 1 : Interpolation par fonction de base radiale carte d'étiage (ArcGIS).

La carte représente la zone d'étude qui se situe dans la région de Mostaganem. Avec un quadrillage de coordonnées d'une projection cartographique UTM/ WGS84 de la zone 31N. La dégradation de couleur montre des valeurs comprises entre (-2.546 et 1.110) avec une succession de courbes de niveau lié au niveau le plus bas des eaux.

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 1 : Valeur des paramètres de RBF carte étiage.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	-0.0007
Mean absolute error (MAE)	0.1298
Mean squared error (MSE)	0.0382
Root mean squared error (RMSE)	0.1955
Equation de la droite	$Y=0.870 \cdot X + (-0.064)$

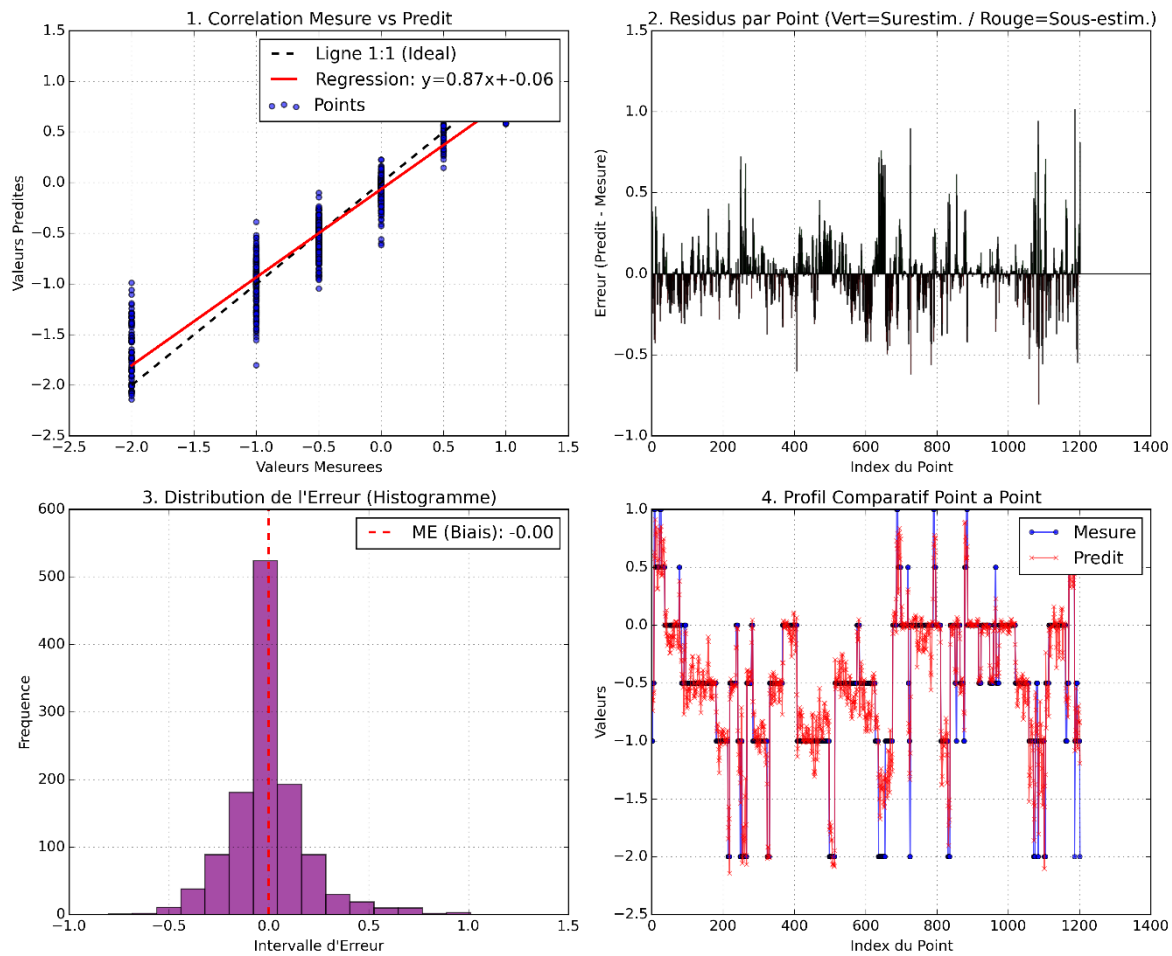


Figure 4- 2 : Graphiques de la cross validation de la carte étiage.

D'après les valeurs motionnées dans le tableau sont très performante : le ME est de -0.0007 présenté par la ligne rouge pointille vertical dans l'histogramme numéro 3, avec une régression qui rapproche à 1 ($=0.87$), et un faible RMSE et MAE qui sont des valeurs proches à être nulles. Les graphes montrent visuellement que le modèle est compatible à la réalité sauf par rapport à quelques points difficiles à prédire.

IV.2 Carte hautes eaux :

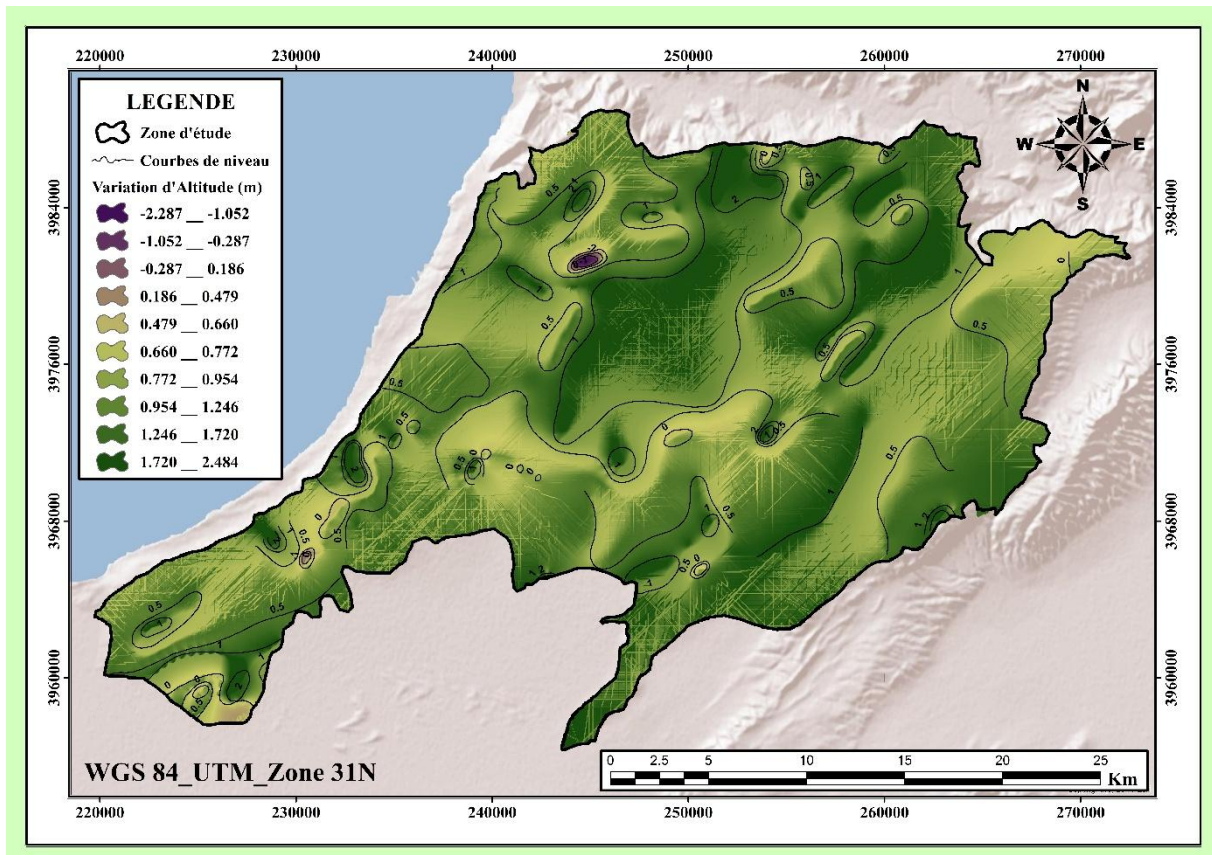


Figure 4- 3 : Interpolation fonction de base radiale carte hautes eaux (ArcGIS).

La carte représente la zone d'étude du Plateau de Mostaganem, elle est alignée sur un système de coordonnées métriques UTM/ WGS84 (zone 31N). Le paramètre varie par un dégradé de couleurs allant de -2.287 à 2.484 mètres, intégrant des courbes en isovaleurs pour illustrer la dynamique des eaux souterraines pendant les périodes de recharge maximale.

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 2 : Valeur des paramètres de la RBF carte hautes eaux.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	0.0023
Mean absolute error (MAE)	0.1571
Mean squared error (MSE)	0.0684
Root mean squared error (RMSE)	0.2615
Equation de la droite	$Y=0.749 \cdot X + 0.182$

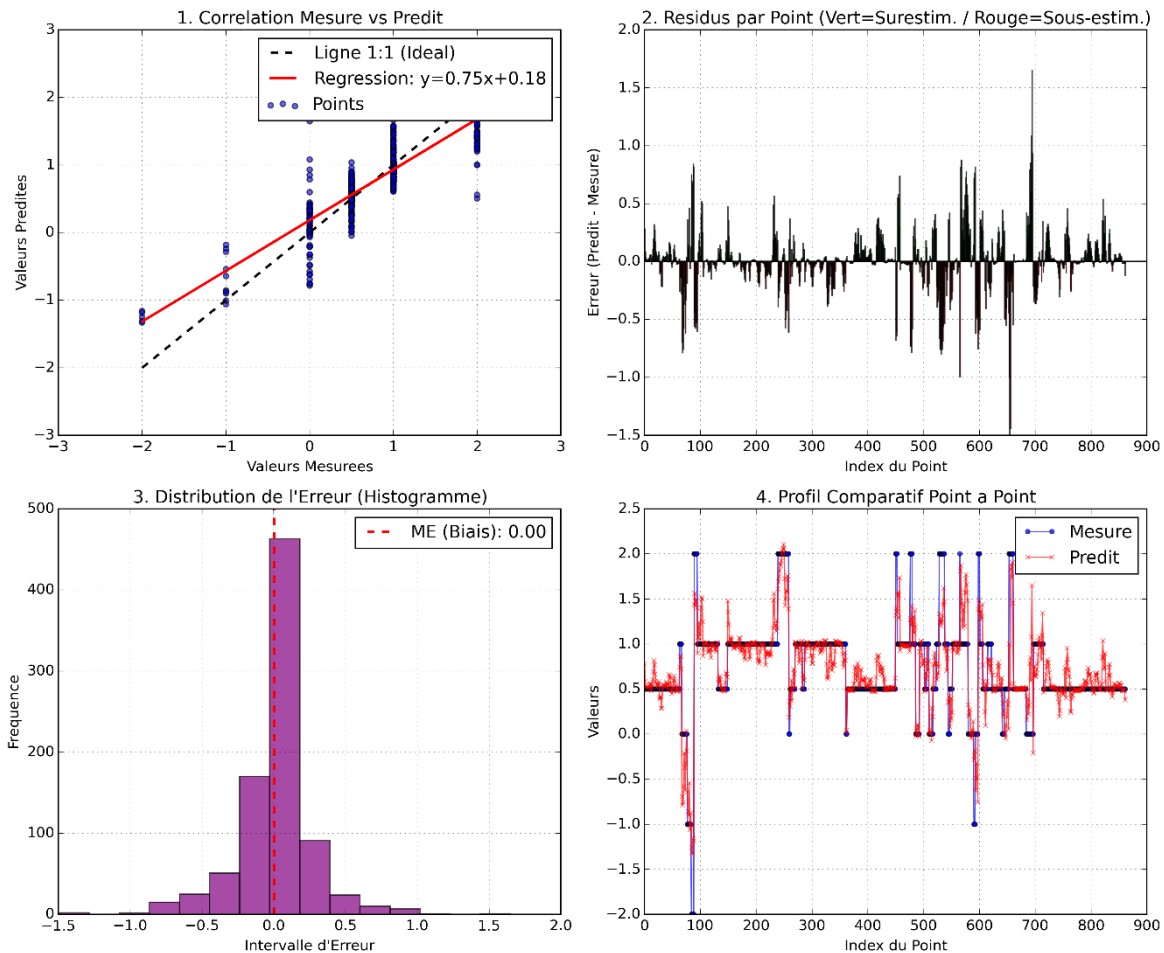


Figure 4- 4 : Graphiques de la cross validation de la carte hautes eaux.

Les différents indicateurs témoignent de la performance du modèle. Le ME est presque nul (0,0023), elle se traduit sur le graphique de distribution des erreurs (figure 3) par une distribution centrée sur zéro. Les paramètres de précision quantitative, notamment l'erreur absolue moyenne (MAE) (0,1571) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (0,2615), présentent de faibles valeurs, indiquant une faible différence entre les valeurs observées et prédits.

Cependant, la droite de régression ($= 0,75$). La comparaison point par point (figure 4) montre une excellente correspondance avec la réalité hydrodynamique du terrain, sauf que certaines anomalies locales (pics résiduels de la figure 2).

IV.3 Carte isobathe :

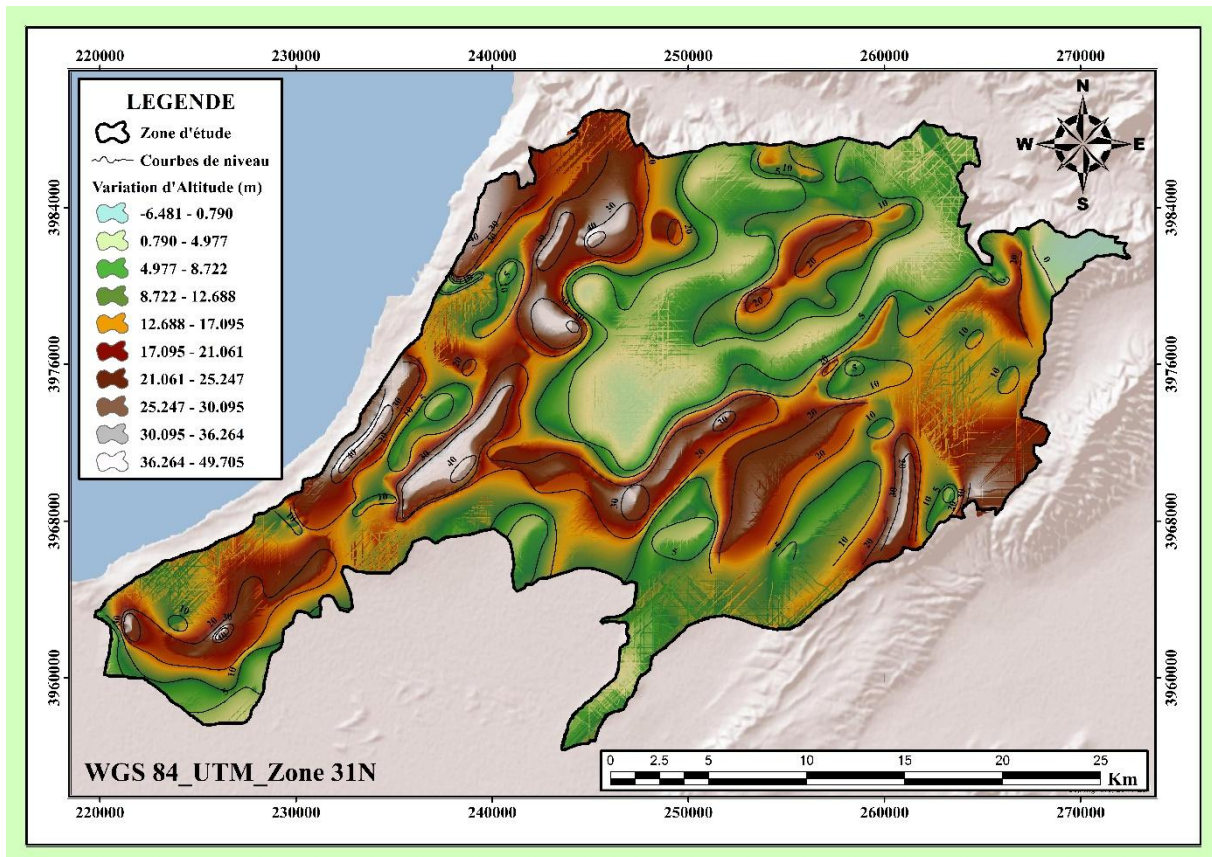


Figure 4- 5 : Interpolation de base radiale carte isobathe (ArcGIS).

La carte isobathe de la région du plateau de Mostaganem caractérisée par un système de coordonnées métriques UTM/WGS84 de zone 31N. Les courbes représentent la profondeur de la nappe. L'Interpolation RBF a donné une dégradation de couleur varié entre -6.481m (minimal) et 40.705m (maximal).

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 3 : Valeur des paramètres de la RBF carte isobathe.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	0.0049
Mean absolute error (MAE)	1.8653
Mean squared error (MSE)	6.9060
Root mean squared error (RMSE)	2.6279
Equation de la droite	$Y=0.899 \cdot X + 1.593$

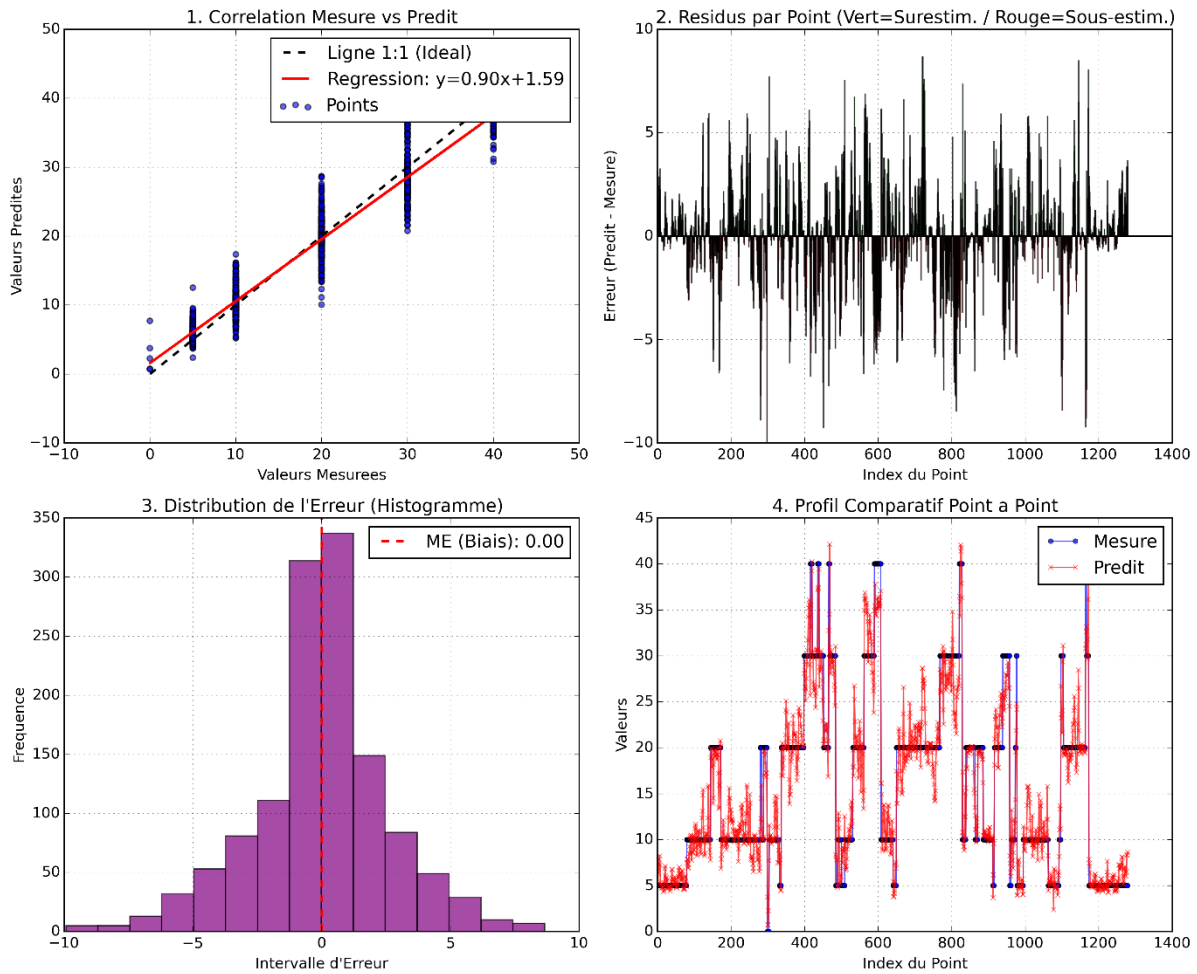


Figure 4- 6 : Graphiques de la cross validation de la carte isobathe.

Les valeurs des résultats prouvent la qualité du modèle. Le ME est nul d'ailleurs dans l'histogramme (3) est négligeable car sa valeur est de 0.0049. Les valeurs des indicateurs de précision le MAE est de (1.8653) LE RMSE (2.6279) et le MSE est de (6.9060) restent des valeurs faibles, c'est à dire qu'il n'y a pas une large différence entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites.

La droite de régression marque une valeur de 0.899 très proche de 1. Pour le profil comparatif point par point, il montre une bonne correspondance à la réalité hormis quelques points.

IV.4 Carte isopièze :

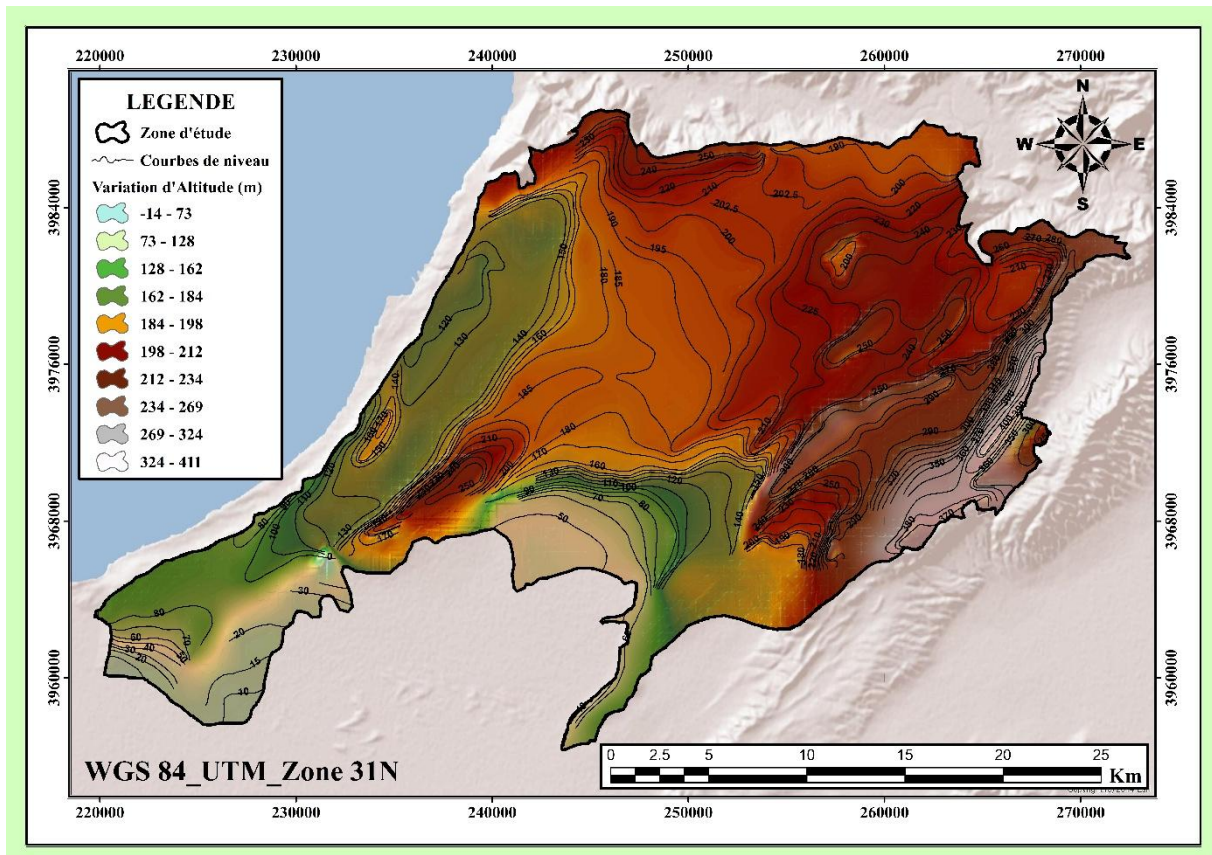


Figure 4- 7 : Interpolation de base radiale carte isopieze (ArcGIS).

La carte isopieze du plateau de Mostaganem a pour système de projection UTM/WGS84 de la zone 31N, unité des coordonnées en mètres (m). Les courbes piézométriques représentées dans la carte relient tous les points d'eau qui ont la même valeur par rapport au niveau de la mer. La variation du niveau d'eau illustrée par les différentes couleurs est comprise entre -14 (m) et 411 (m).

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 4 : Valeur des paramètres de la RBF carte isopieze.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	0.0133
Mean absolute error (MAE)	2.5992
Mean squared error (MSE)	18.7187
Root mean squared error (RMSE)	4.3265
Equation de la droite	$Y=0.994*X+ 1.553$

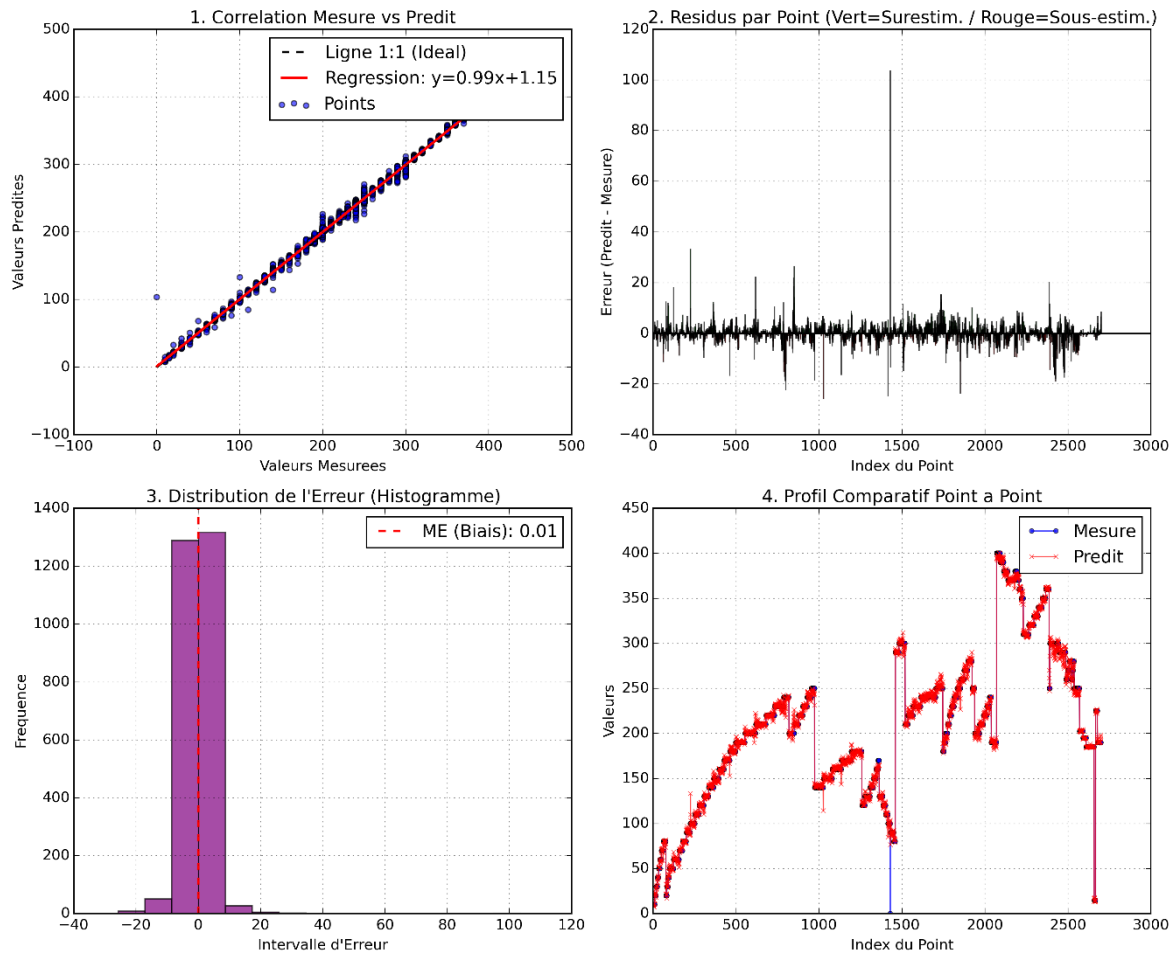


Figure 4- 8 : Graphiques de la cross validation de la carte isopieze.

En résumé, le modèle d'interpolation utilisant la fonction de base radiale présente des performances acceptables et robustes. Le modèle imite fidèlement les données réelles parce que l'erreur absolue moyenne très faible (environ 2,6 unités) et une droite de régression parfaite (= 0,99).

Bien que la distribution globale des erreurs soit absolument centrée autour de zéro, l'analyse démontre une anomalie locale significative (un pic d'erreur supérieur à 100 autour de l'indice 1400) qui justifie des tests localisés afin d'exclure toute valeur aberrante potentielle.

IV.5 Carte toit substratum :

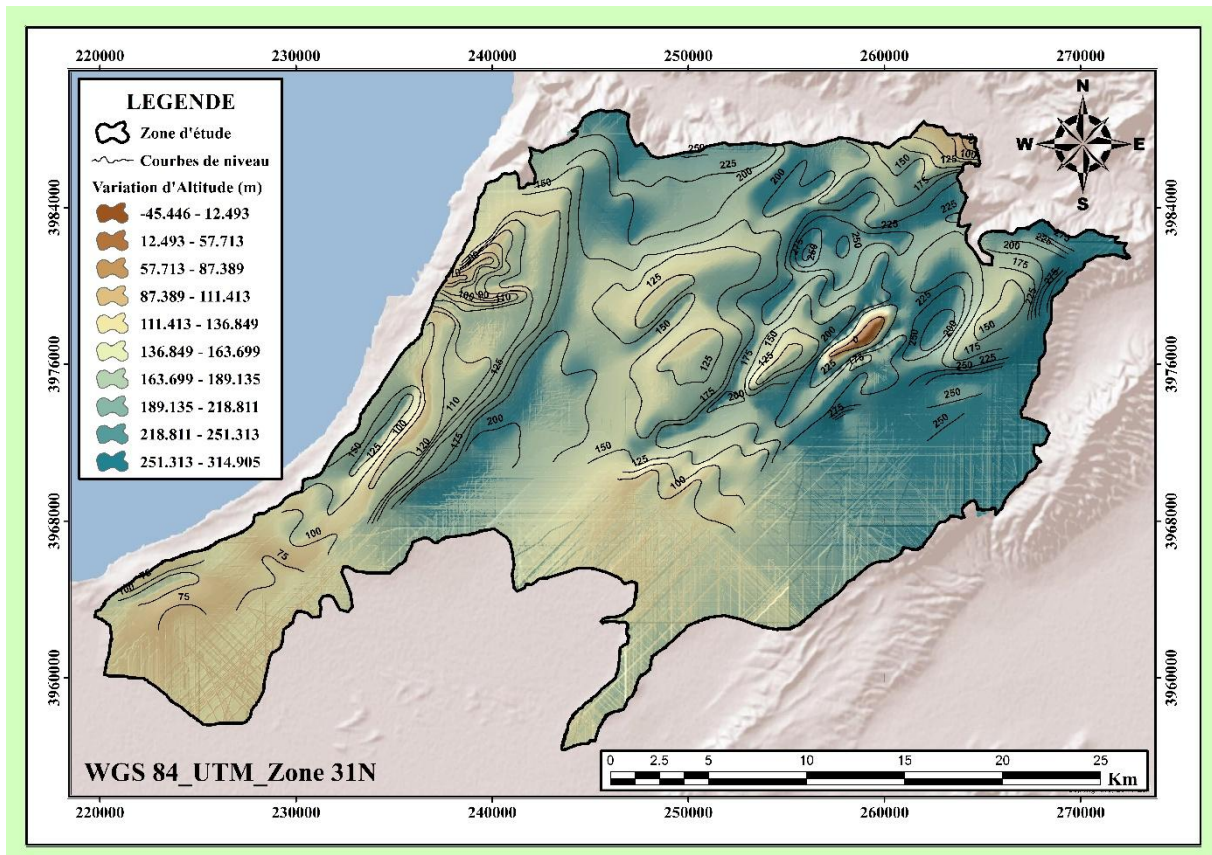


Figure 4- 9 : Graphiques de la cross validation de la carte toit substratum (ArcGIS).

La carte du toit du substratum de la nappe du plateau de Mostaganem. L'interpolation RBF est appliquée suivant le système de projection de la carte UTM/WGS84 de la zone 31N. Les profondeurs présentées dans la légende avec des couleurs variant entre une valeur minimale de -45.446(m) et une valeur maximale de 314.905(m).

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 5 : Valeur des paramètres de la RBF carte toit substratum.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	0.2080
Mean absolute error (MAE)	6.6059
Mean squared error (MSE)	214.184
Root mean squared error (RMSE)	14.6351
Equation de la droite	$Y=0.896 \cdot X + 16.823$

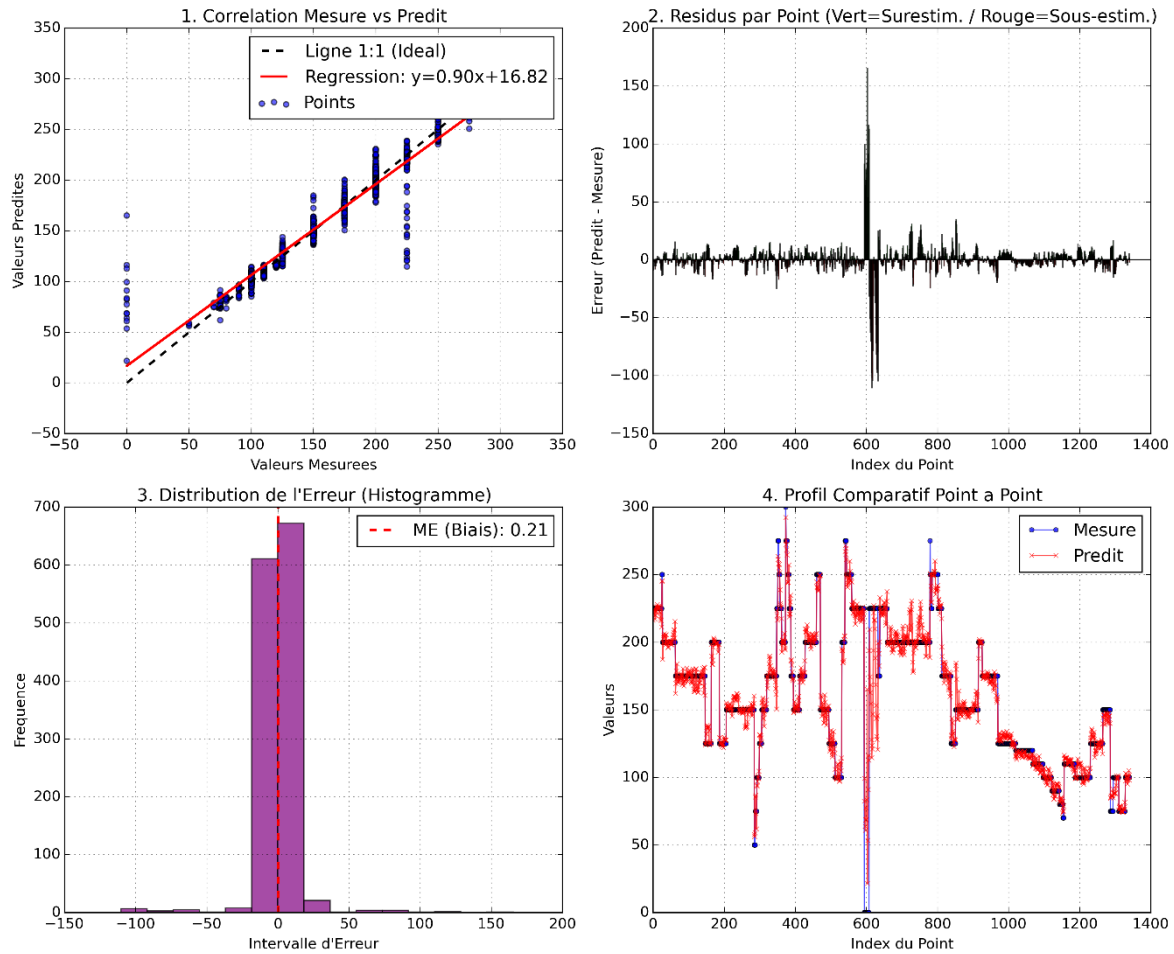


Figure 4- 10 : Graphiques de la cross validation de la carte du toit du substratum.

En résumé, le modèle d'interpolation RBF appliqué au toit substratum reste acceptable (erreur absolue moyenne d'environ 6,61 unités). La droite de régression (= 0,90).

Le modèle ne parvient pas à simuler la chute brutale des valeurs réelles pour cela il n'a pas atténué une performance parfaite suite à une anomalie entre les indices 600 et 650, ce qui entraîne une augmentation de l'erreur quadratique moyenne de 14,64.

IV.6 Carte de gradient hydraulique :

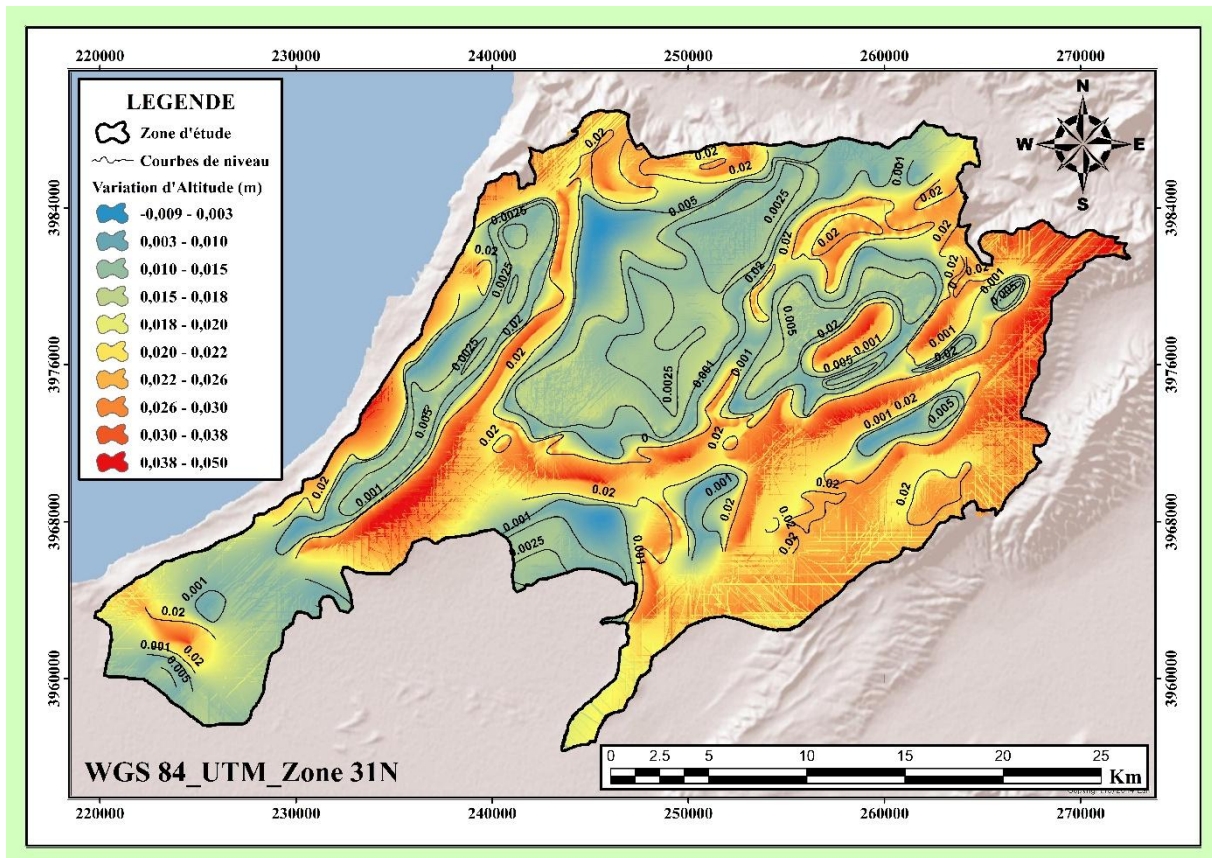


Figure 4- 11 : Interpolation de base radiale carte gradient hydraulique (ArcGIS).

Les coordonnées de la carte du gradient hydraulique sont sous le système de projection UTM/WGS84 de la zone 31N. Ce paramètre hydrodynamique est représenté par des courbes (0.001 et 0.02). Les résultats d'interpolation ont donné des variations d'écoulements compris entre -0.009 et 0.05 (m).

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 6 : Valeur des paramètres de la RBF de la carte du gradient hydraulique.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	-0.0003
Mean absolute error (MAE)	0.0052
Mean squared error (MSE)	0.000
Root mean squared error (RMSE)	0.0070
Equation de la droite	$Y=0.480 \cdot X + 0.005$

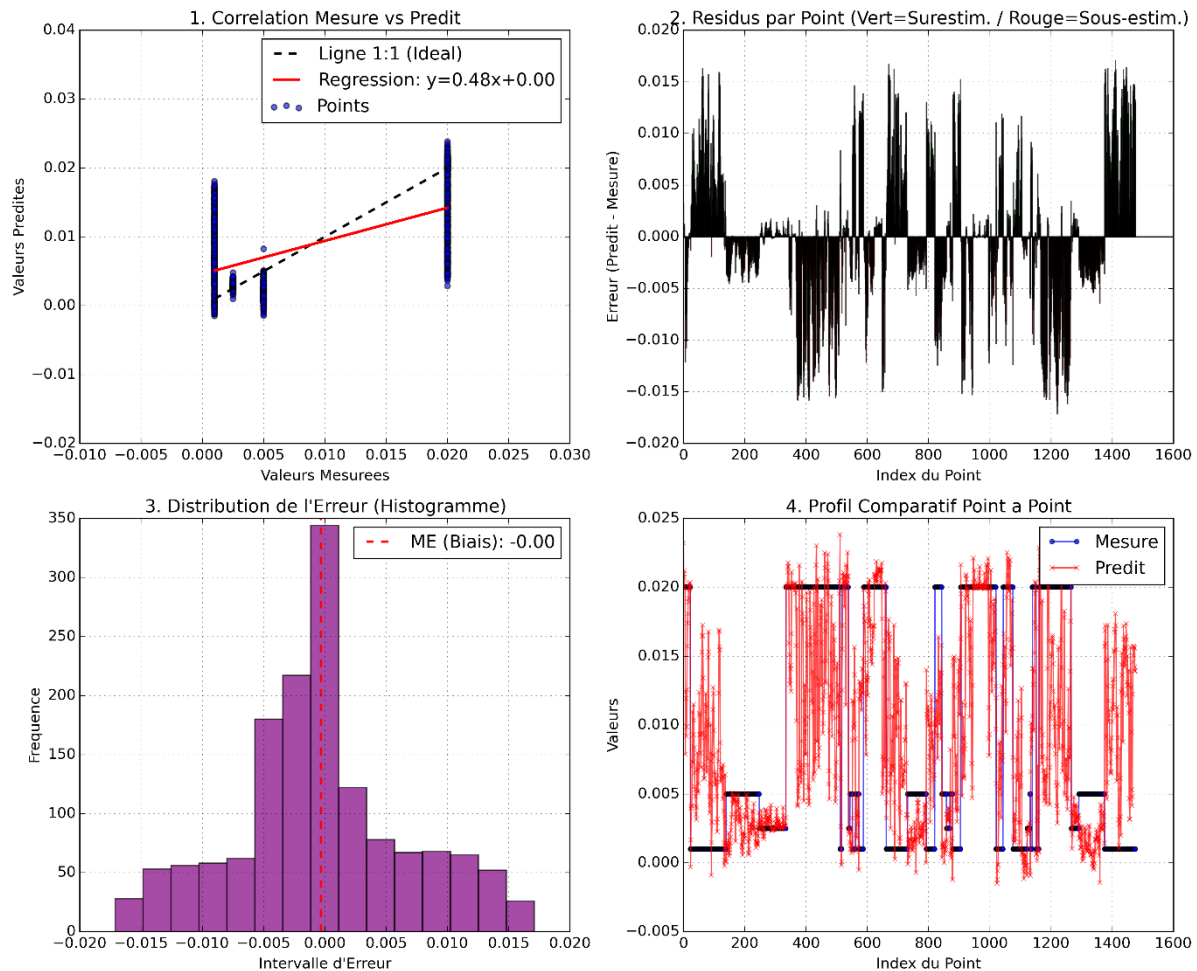


Figure 4- 12: Graphiques de la cross validation de la carte du gradient hydraulique.

La droite de régression s'effondre ($=0.48$) veut que le modèle n'arrive pas à stimuler entre les valeurs réelles et prédites et ça se confirme dans le profil comparatif points à point par un large écart entre les points mesurés et prédits. Donc le modèle RBF Multiquadratic est moins performant par rapport au modèle précédent suite à la nature des données du gradient hydraulique.

IV.7 Carte de transmissivité :

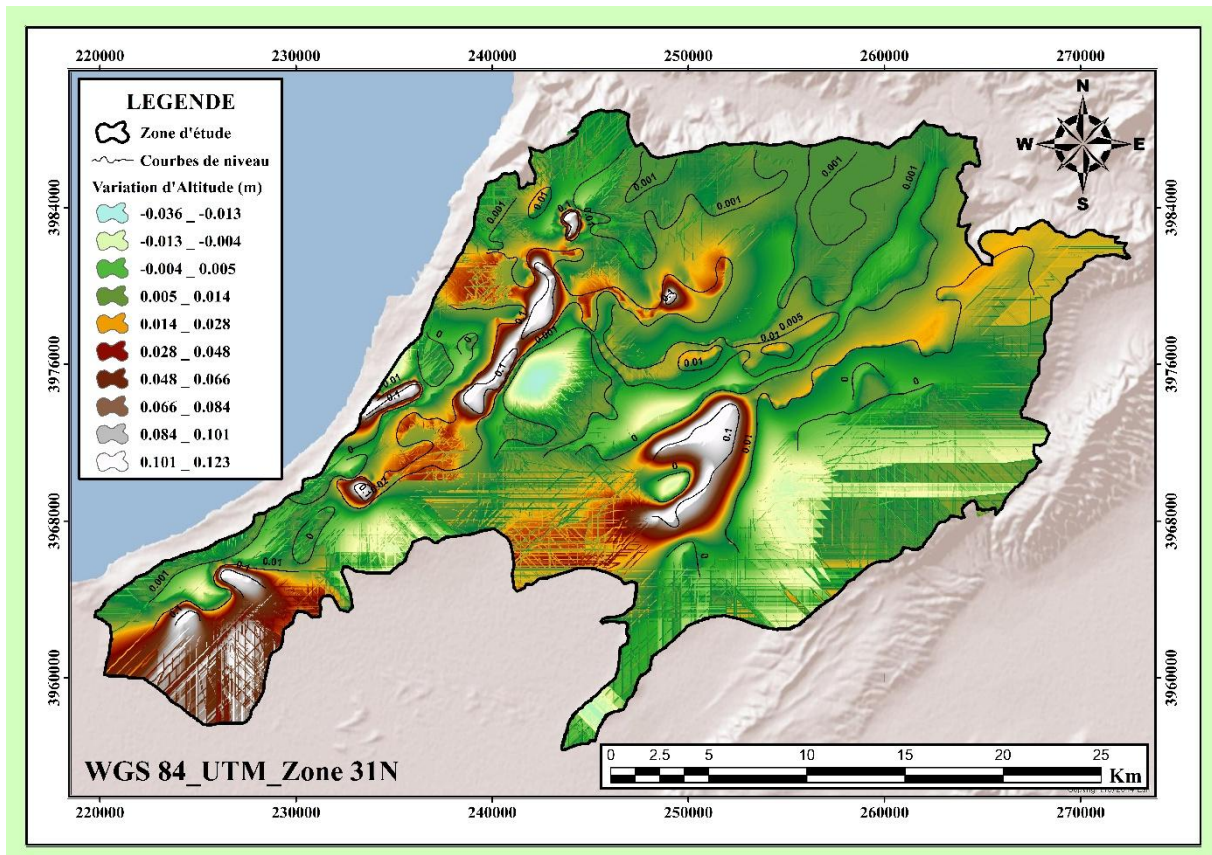


Figure 4- 13 : Interpolation de base radiale carte de transmissivité (ArcGIS).

La carte de transmissivité du plateau de Mostaganem dépend de la géologie de la zone, le résultat d'interpolation a donné une variété d'altitude représentée par des couleurs avec une valeur minimale de -0.0365 m et une valeur maximale de 0.123 m.

Les valeurs de la validation croisée (cross validation) :

Tableau 4 n° 7 : Valeur des paramètres de la RBF carte transmissivité.

Paramètre	Valeur
Mean error(ME)	0.0001
Mean absolute error (MAE)	0.0084
Mean squared error (MSE)	0.0003
Root mean squared error (RMSE)	0.0169
Equation de la droite	$Y=0.71 \cdot X + 0.006$

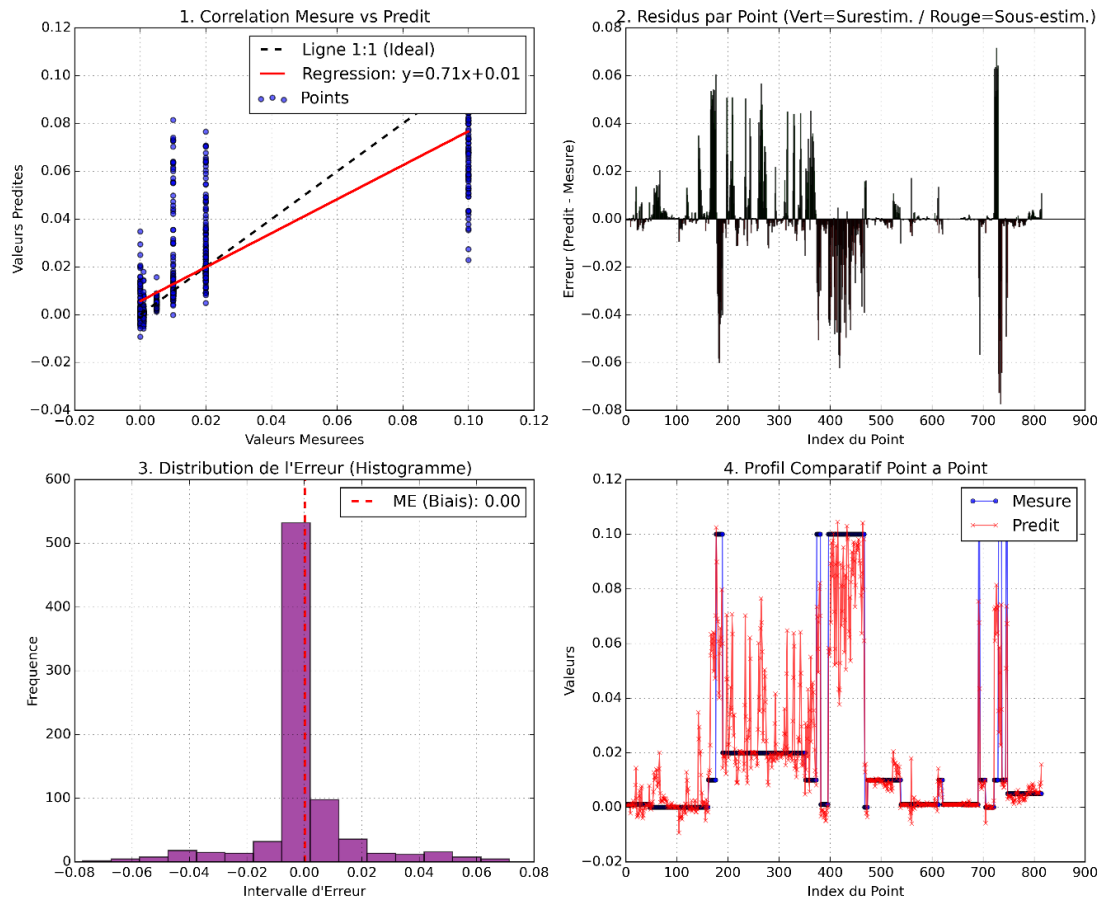


Figure 4- 14 : Graphiques de la cross validation de la carte du la transmissivité.

Malgré les faibles valeurs quantitatives des indicateurs, le ME, MSE, RMSE sont presque nuls. Mais ce modèle reste le moins performant, visuellement la droite de régression qu'est de ($=0.71$) ne suit pas correctement la ligne optimale, et donc l'interpolation manque de perfection.

Le profil (4) confirme que la valeur de la régression est loin de 1 parce que le modèle n'arrive pas à se caler parfaitement entre les points réels et prédits.

Pour les cartes des paramètres hydrochimiques. [Annexes.].

V. Conclusion :

Ce chapitre a expliqué la méthode d'interpolation Radiale Basis Fonction (RBF) par le logiciel ArcGIS, afin de transformer les données ponctuelles et numérisées en des surfaces connectées représentant les paramètres hydrodynamiques de la nappe étudiée.

La RBF Multiquadrique est capable de modéliser des variations non linéaires sur des grandes surfaces, La validation croisée des résultats a confirmé la fiabilité du modèle avec des faibles erreurs et une concordance entre les valeurs prédites et mesurées pour ces cartes. Seules les cartes du gradient hydraulique et de la transmissivité ont présenté certaines limitations dues à la complexité de leurs données sources.

Les cartes produites avec cette méthode offrent des informations de base. Car ces données peuvent servir de référence quantitative pour diverses analyses, allant de la gestion à l'interprétation de la nappe du Plateau de Mostaganem.

Conclusion Générale :

Cette étude visait à concevoir et à mettre en œuvre un Système d'Information Géographique (SIG) pour étudier et modéliser les paramètres hydrodynamiques de la nappe du plateau de Mostaganem, en utilisant des ressources cartographiques historiques et des outils modernes d'analyse spatiale.

Les résultats préliminaires de cette étude, basés sur l'analyse de données de télédétection de 1985 à 2024, ont mis en évidence une intense activité géodynamique sur le plateau de Mostaganem. L'urbanisation massive, la fragmentation des terres agricoles et les changements d'affectation des sols exercent des pressions démographiques croissantes. Ces transformations capitales constituent une menace directe pour les ressources naturelles locales, notamment pour l'approvisionnement et la durabilité des ressources en eau souterraine, justifiant ainsi le besoin urgent d'outils d'aide à la décision.

Pour relever le défi de la gestion durable, une méthodologie rigoureuse a été mise en œuvre pour le traitement des données géographiques historiques. Face à l'absence de grille de coordonnées et l'état des supports originaux, la méthode de géoréférencement relatif s'est avérée la plus fiable. Sur la base de la carte hydrogéologique de 1974 DEMRH et l'application d'une transformation polynomiale du premier ordre (transformation affine), les données historiques ont été géoréférencées avec une précision remarquable. L'intégration de ces données historiques aux normes géospatiales actuelles a été réalisée par le système de projection UTM (WGS84).

L'étape de numérisation a permis d'organiser l'ensemble de ces informations au sein d'une base de données géographiques. Le réseau hydrologique, les points d'eau et les variables hydrodynamiques et hydrochimiques ont ainsi été convertis en entités exploitables.

A la fin, l'application de l'interpolation spatiale par fonction de base radiale (RBF) précisément le type Multiquadratic et par conséquent la validation croisée ont confirmé la fiabilité du modèle pour la plupart des paramètres, malgré certaines limitations rencontrées dans certaines cartes liées à la complexité de leurs données sources.

En conclusion, les cartes thématiques élaborées dans ce projet de fin d'étude constituent une référence quantitative unique pour la nappe du plateau de Mostaganem. Elle démontre que la combinaison de la cartographie classique aux techniques SIG, ont engendré des résultats qui seront le point de départ de toute étude qui va contribuer à l'aide de prise de décision, la planification, la gestion ainsi que la protection des ressources en eau de la région.

Bibliographie :

Chapitre 1 :

([Aberkane, 2016](#)). Aberkane Mohamed (2016). *Estimation de la recharge naturelle d'une nappe d'eaux souterraines : cas de la nappe du plateau de Mostaganem (Algérie)*. Mémoire de Master. Université d'Oran 2.

([Allaoui, 2020](#)). Allaoui Hadjira (2020). *Etat et qualité des eaux phréatiques dans la wilaya de Mostaganem*. Mémoire de Master. Université Abdelhamid BenBadis UMAB Mostaganem.

([Amari & al, 07 novembre 2022](#)) : Amari Houria, & al. (2022, 7 novembre). *Cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution de la région de Mostaganem par application de la méthode des complexes hydrogéologiques (HCS)*. Mémoire de Master. Université d'Oran 2.

([Bellal, 2016](#)). Bellal Sid-Ahmed. (2016). *Sècheresse et fluctuations des ressources en eau souterraines : LE cas du Plateau de Mostaganem (ouest ALGERIEN)*.

([GAUCHEZ 1981](#)). Gauchez Jack. (1981). *Étude hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (Algérie)*.

([Ramdane, 2017](#)). Ramdane Nabile. (2017). *Des horizons d'accumulation carbonates ("calcretes") aux environs de Mostaganem (Ain Nouissy) : description, calcretisation et pedogenese*. Mémoire de Master. Université d'Oran 2.

Chapitre 2 :

([Affek, A. 2013](#)). Affek, A. (2013). Georeferencing of historical maps using GIS, as exemplified by the Austrian Military Surveys of Galicia. *Geographia Polonica*, 86(4), 375–390. <https://doi.org/GPol.2013.30>

([From Paper Map to Geospatial Vector Layer : Demystifying the Process](#)
[Peter Peller1](#)).

Chapitre 3 :

(Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG- territoire numérique).

(Caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbes).

(LES GEODATABASES DANS ARCGIS- Philippe LÉPINARD).

(Les paramètres hydrodynamiques /définition, SIGES AQUIFERE RHENAN).

(SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE COURSET TRAVAUX PRATIQUE- université Tlemcen).

Chapitre 4 :

(Hardy, R.L 1971). Hardy, R. L. (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 76(8), 1905–1915.
<https://doi.org/10.1029/JB076i008p01905>

Webographie :

Chapitre 2 :

- [1] (<https://www.lenovo.com/>).
- [2]. ([ArcGIS resources.com / esri](https://resources.arcgis.com/en/esri/)).
- [3]. ([Https://Www.Sbg-Systems.Com/Fr/Glossary/Georeferencing/](https://www.sbg-systems.com/fr/glossary/georeferencing/))
- [4].([Https://tutoqgis.cnrs.fr/04_04_parametrage.php#IV41a](https://tutoqgis.cnrs.fr/04_04_parametrage.php#IV41a)).
- [5]. ([Altigator.com](https://altigator.com/)).
- [6]. ([Tutoriel GIS](https://tutorielgis.com/)).
- [7]. ([ArcGIS pro.com](https://pro.arcgis.com/fr/)).
- [8]. (https://pro.arcgis.com/fr).

Chapitre 3 :

- [1]. ([ESRI ArcGIS](https://www.esri.com/)).
- [2]. ([Http://gerssat.chez-alice.fr/sig/gereravecunsig.htm](http://gerssat.chez-alice.fr/sig/gereravecunsig.htm)).
- [3]. ([Http://gerssat.chez-alice.fr/sig/gereravecunsig.htm](http://gerssat.chez-alice.fr/sig/gereravecunsig.htm)).
- [4]. ([Esri, arcgis ressources .com](https://resources.arcgis.com/en/)).
- [5]. (https://www.sandre.eaufrance.fr).
- [6]. ([Https://Www.Vetofish.Com/](https://www.vetofish.com/)).

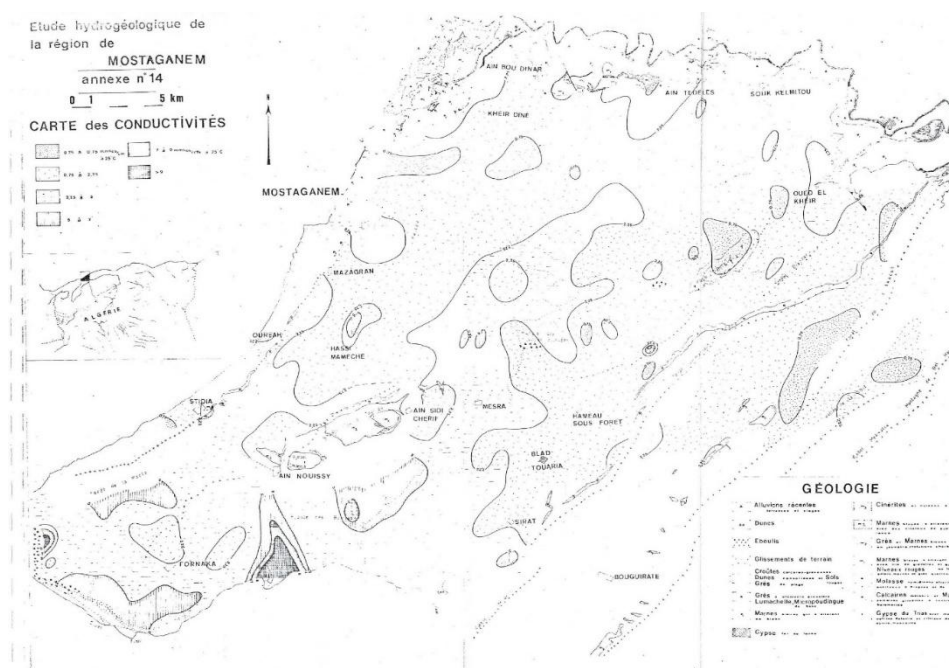
Chapitre 4 :

- [1]. ([Https://fr.statisticseasily.com/glossario](https://fr.statisticseasily.com/glossario)).
- [2]. (https://pro.arcgis.com/fr).
- [3]. (<https://fr.statisticseasily.com/glossario>).

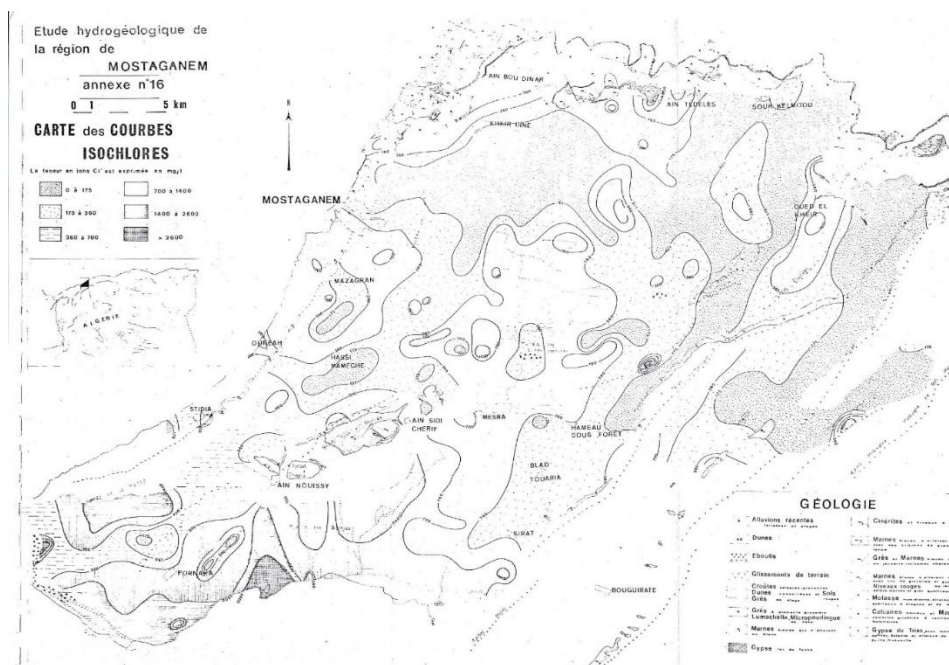
- [4]. (<https://Developer.Nvidia.Com/Blog/A-Comprehensive-Overview-Of-Regression-Evaluation-Metrics/>)
- [5]. (<https://www.jybaudot.fr/Stats/indicecartes.html>).
- [6]. (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/root-mean-square-error>)
- [7]. (<https://www.alloprof.qc.ca/fr>).

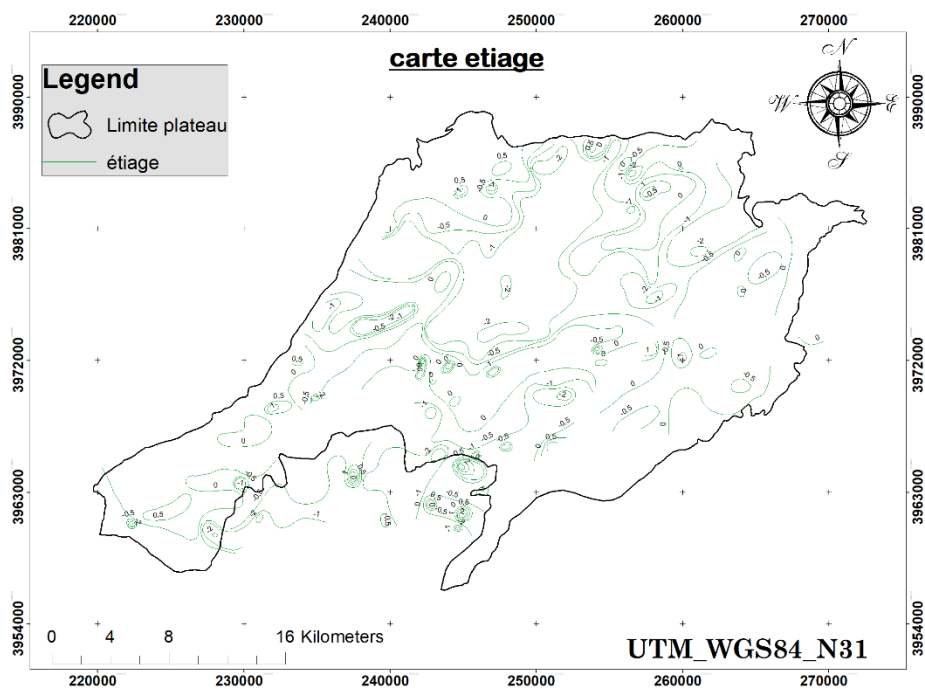
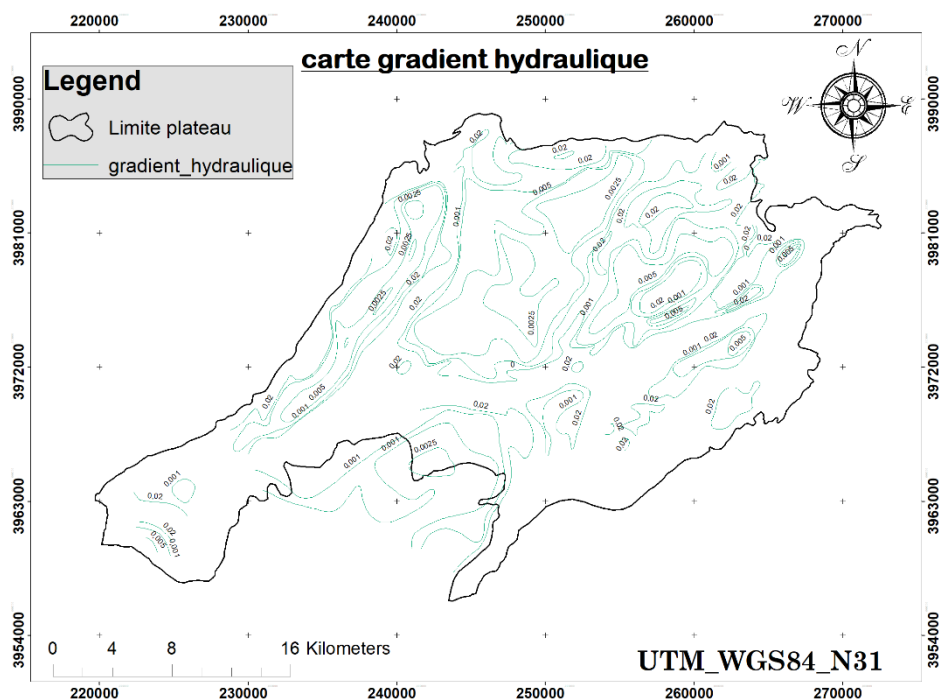
Hydrochymiques :

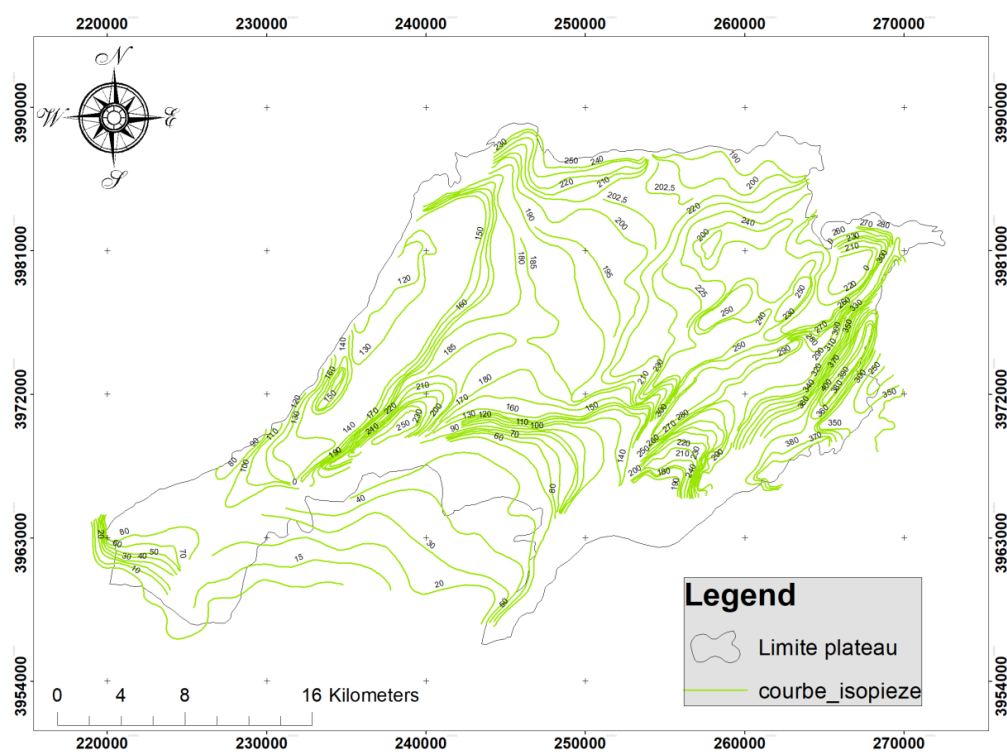
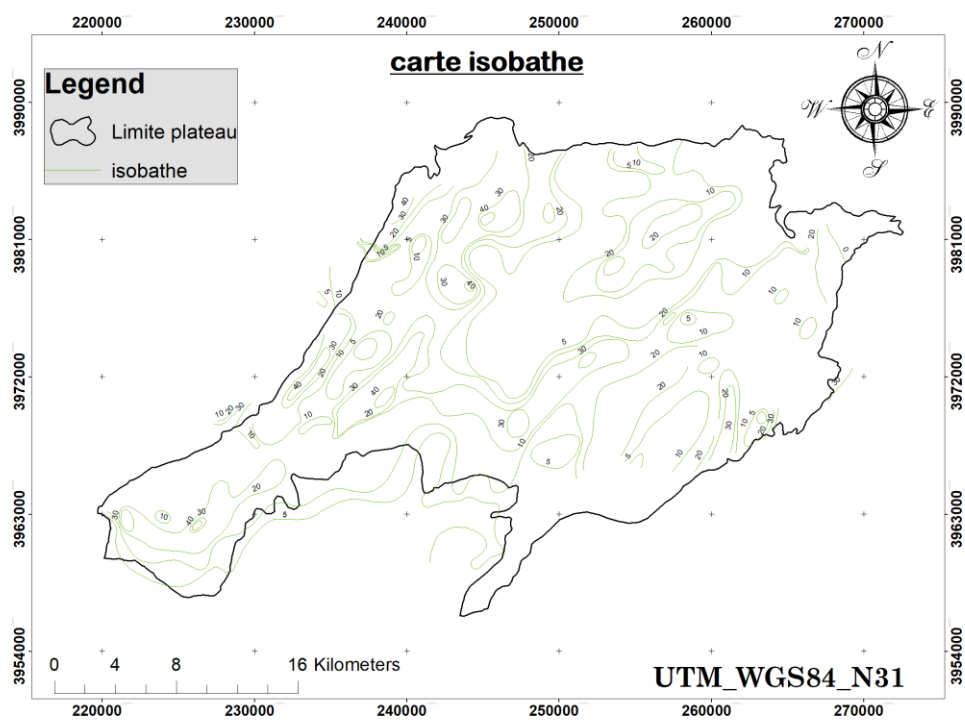
Carte de conductivités :



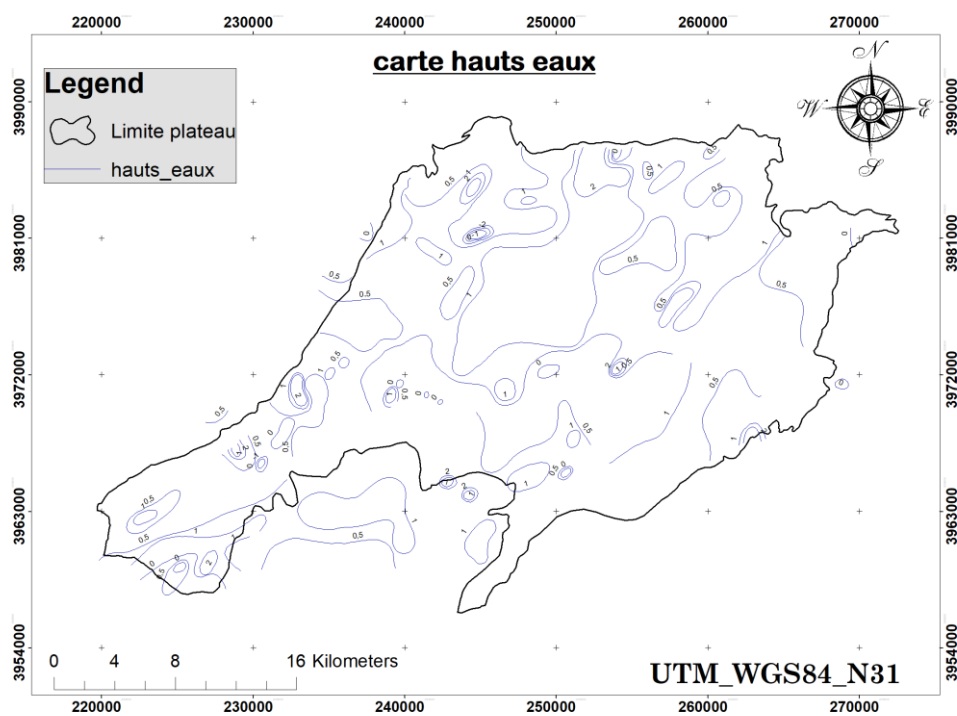
Carte des courbes isochlores :



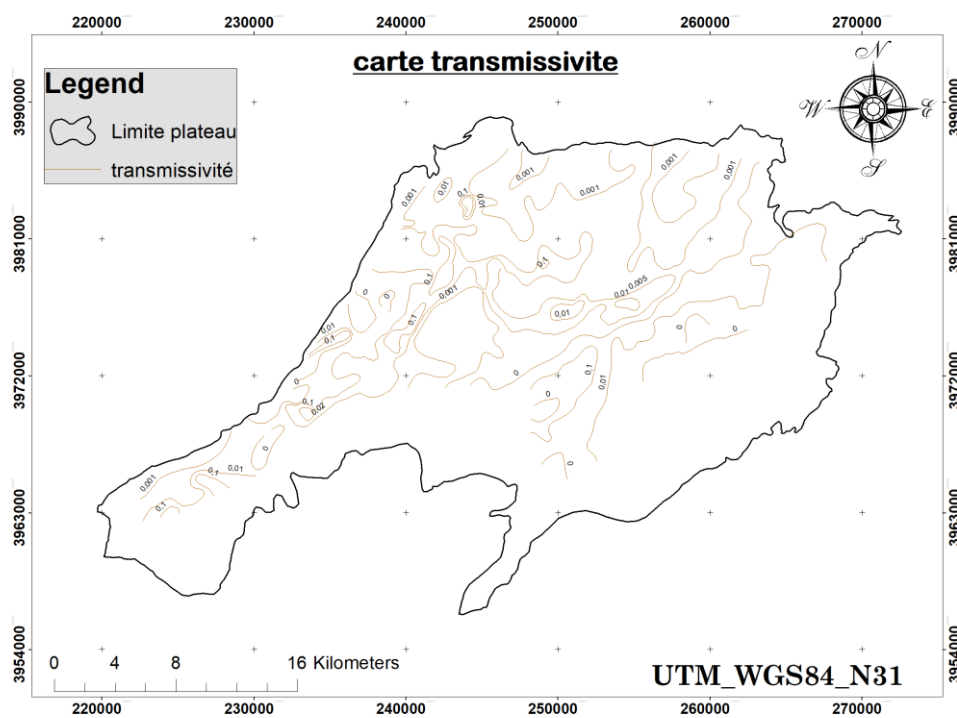
Numérisation :**Carte d'étiage :****Carte du gradient hydraulique :**

Carte Isopièzes :**Carte isobathe :**

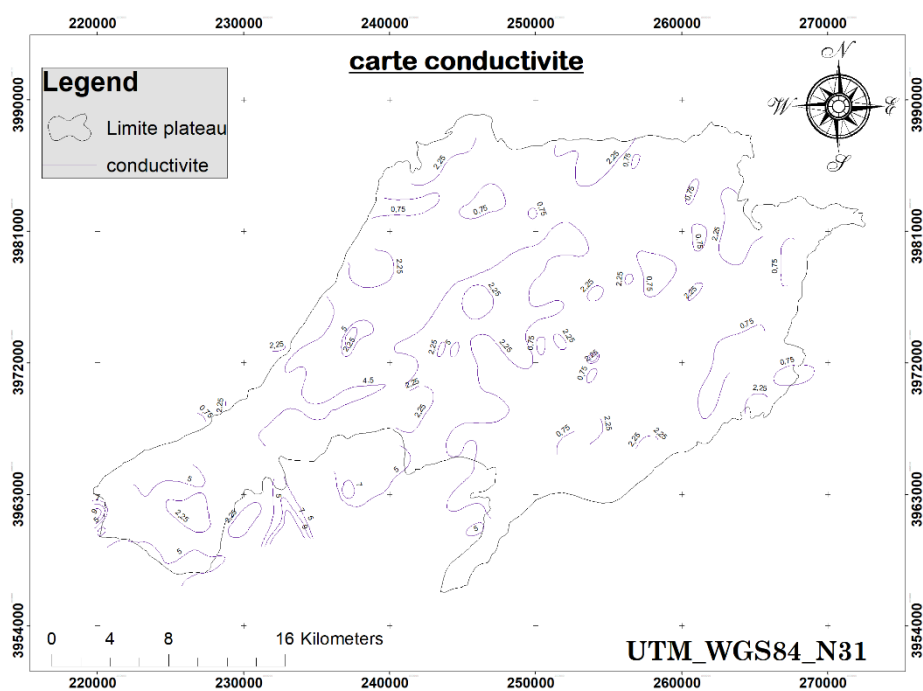
Carte haures eaux :



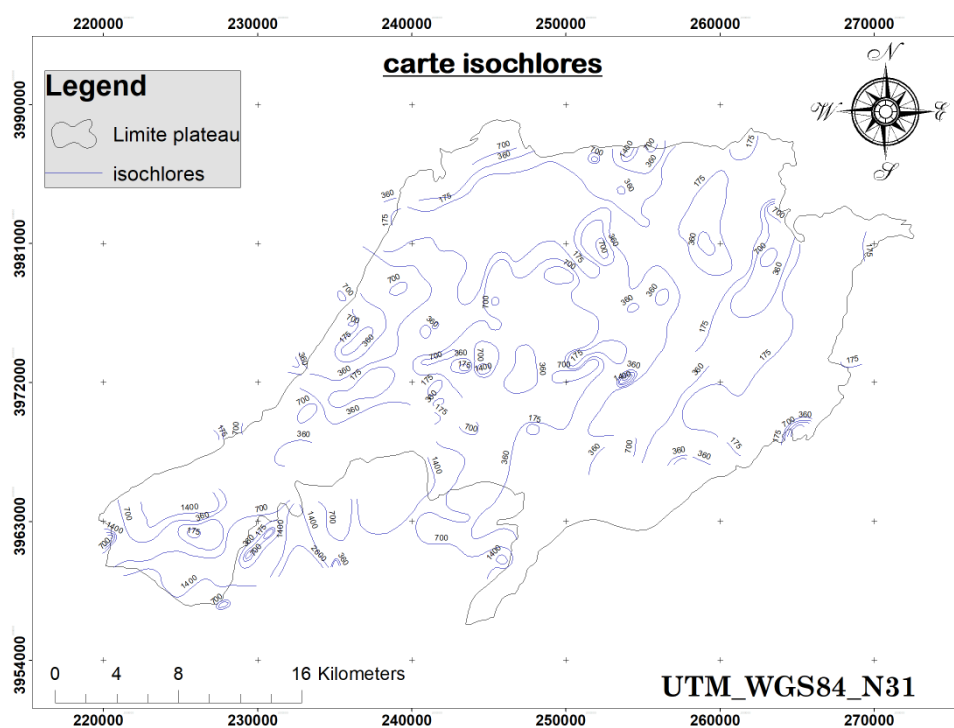
Carte de transmissivité :

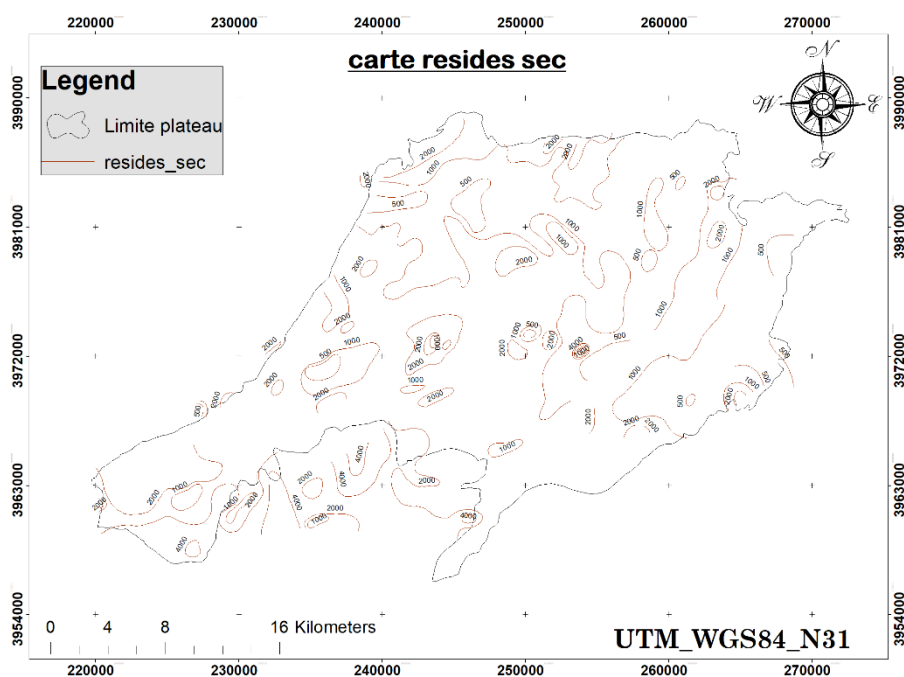


Carte de la conductivité :



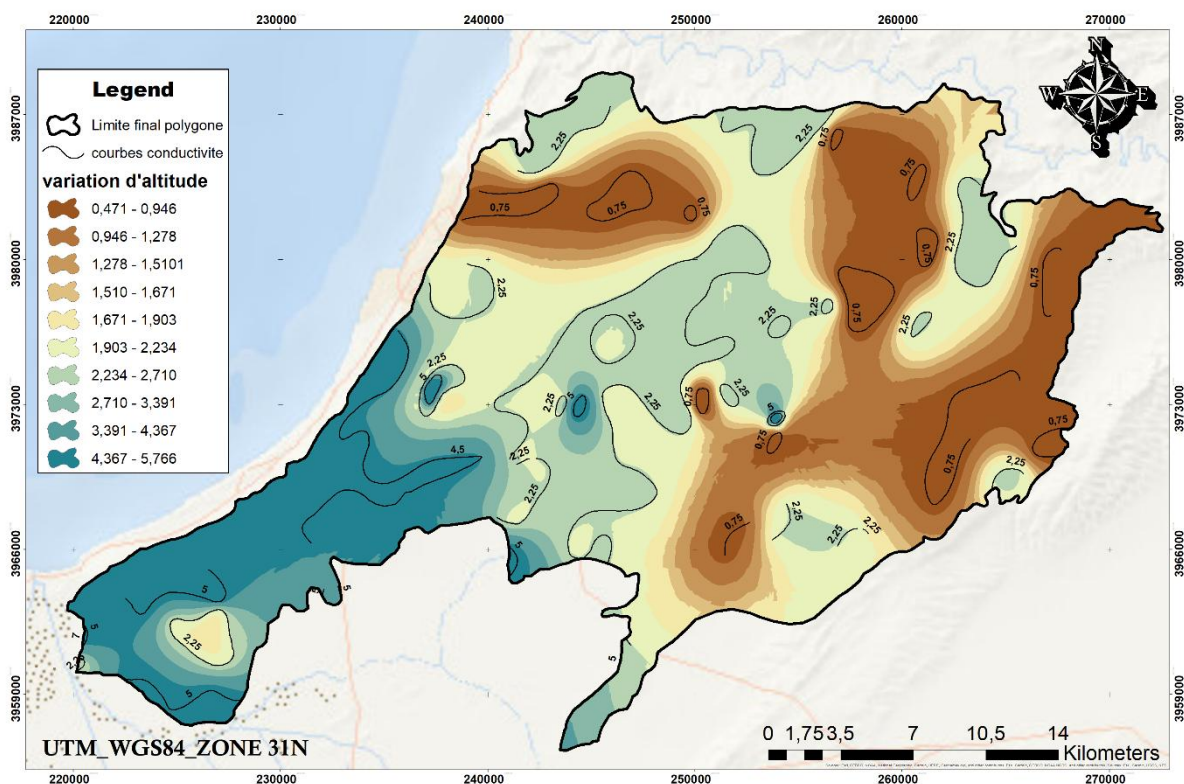
Carte des courbes isochlores :



Carte des résidus secs :

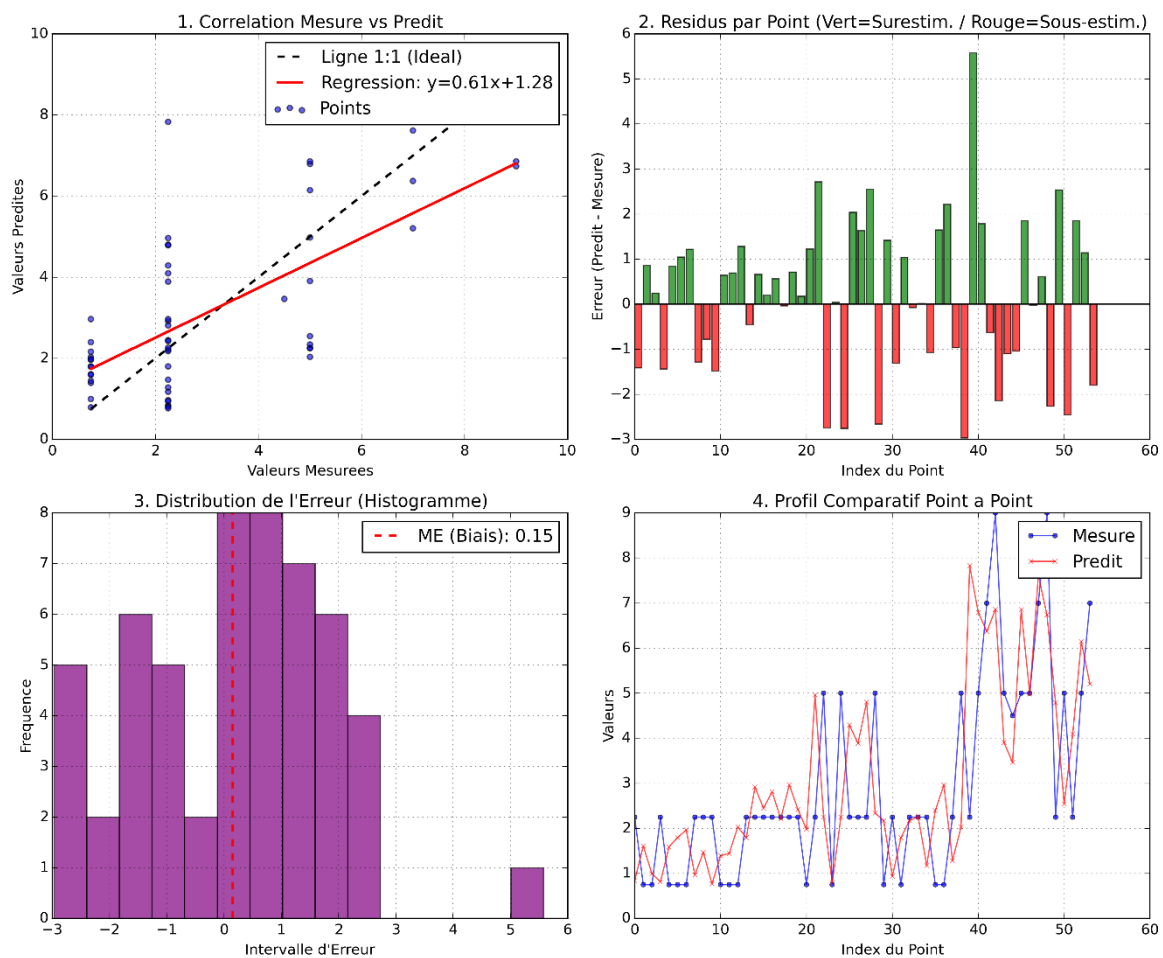
Interpolation RBF :

Les cartes hydrochimiques :

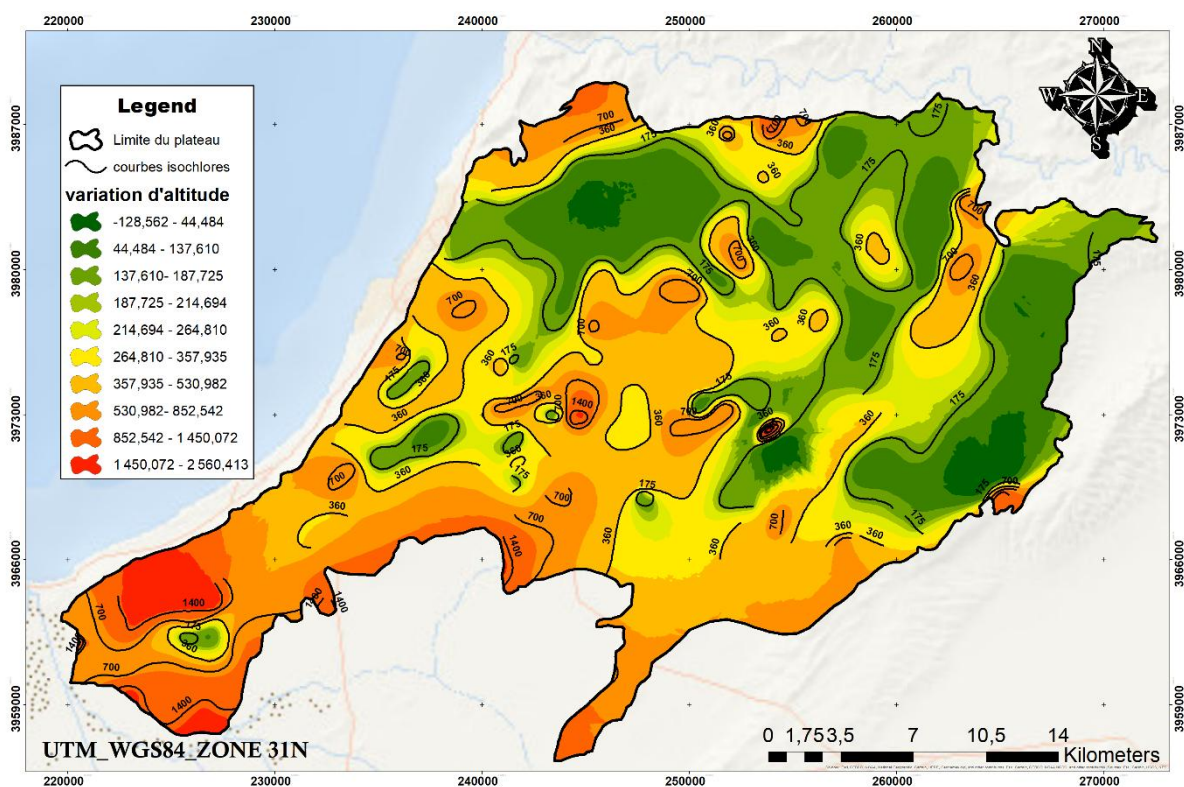
Carte conductivité :

Valeur de cross validation conductivité :

Paramètre	valeur
Mean error(ME)	0.1515
Mean absolute error (MAE)	1.3690
Mean squared error (MSE)	2.8767
Root mean squared error (RMSE)	1.6961
Equation de la droite	$Y=0.614 \cdot X + 1.281$

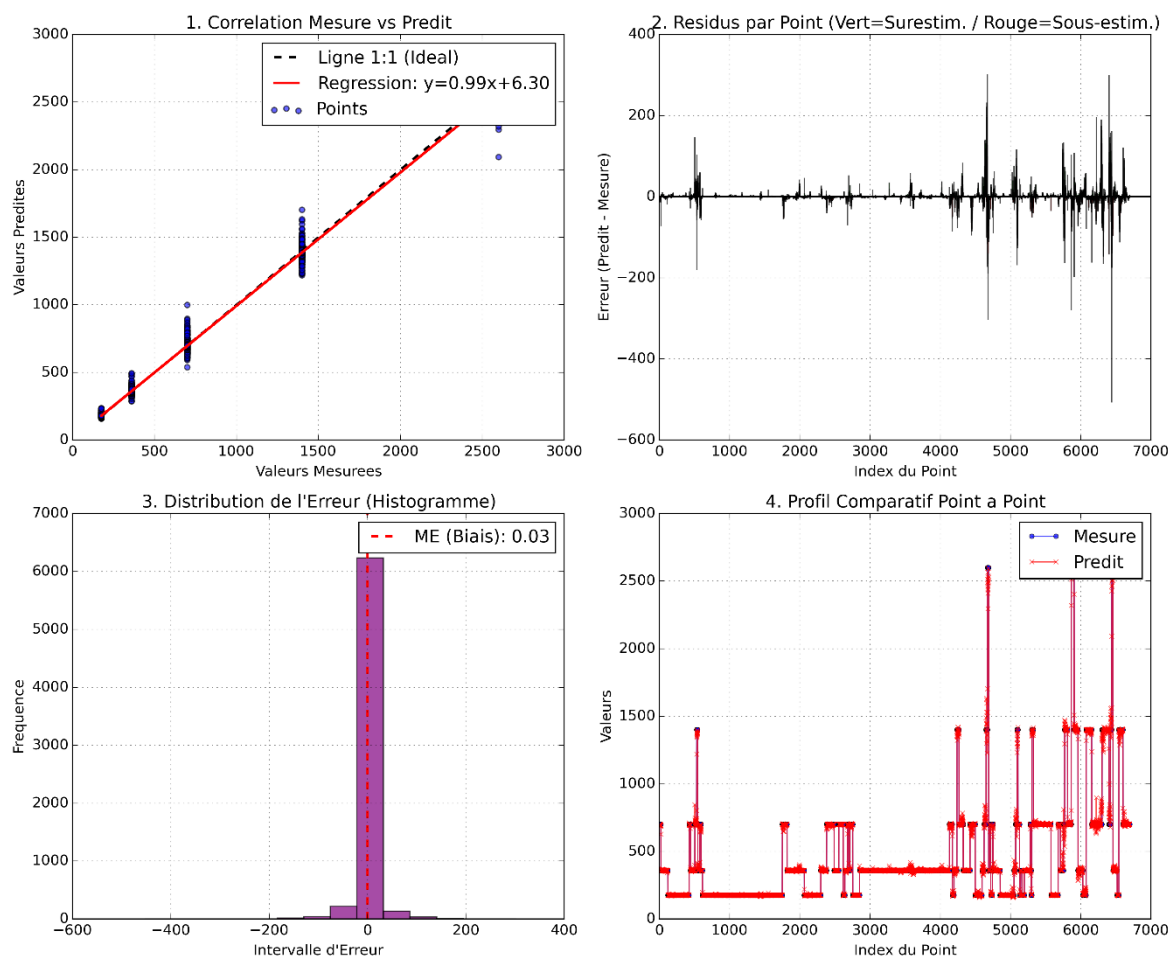


Carte isochlores :

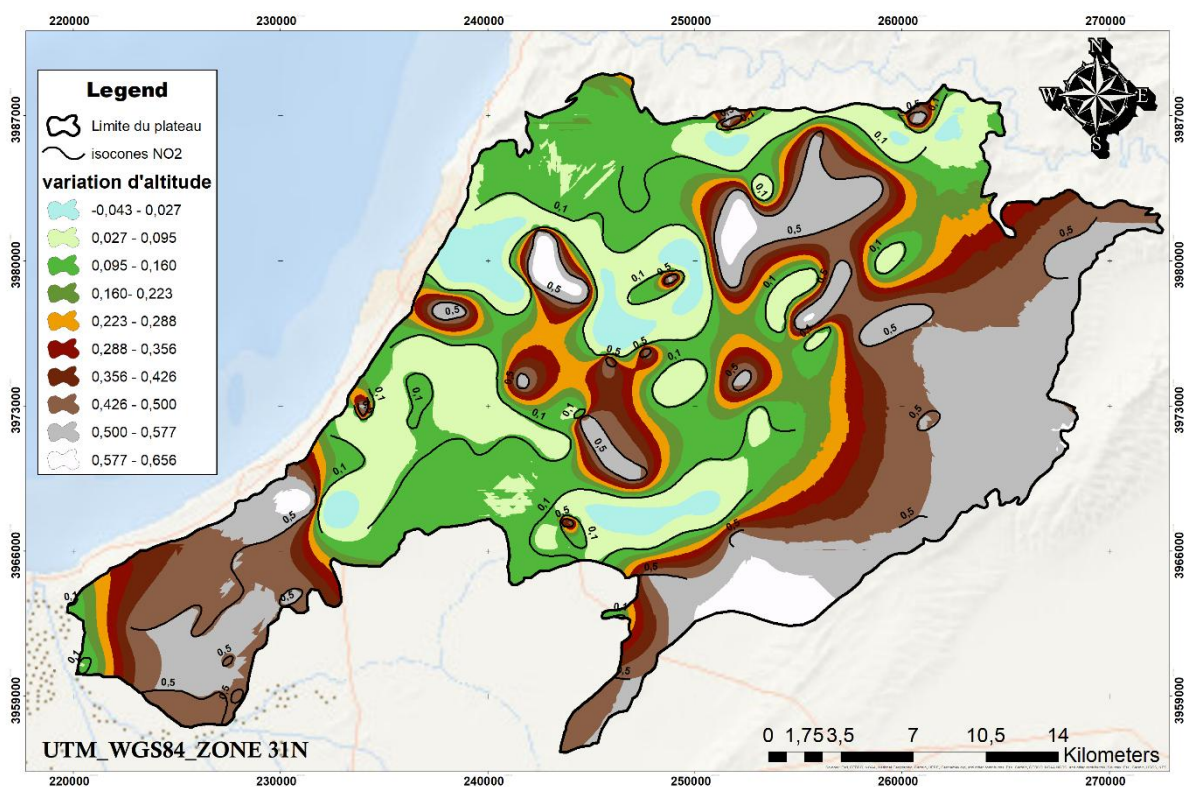


Valeur de cross validation isochlores :

Paramètre	valeur
Mean error(ME)	0.0286
Mean absolute error (MAE)	7.2157
Mean squared error (MSE)	485.5183
Root mean squared error (RMSE)	22.0345
Equation de la droite	$Y=0.986 \cdot X + 6.297$



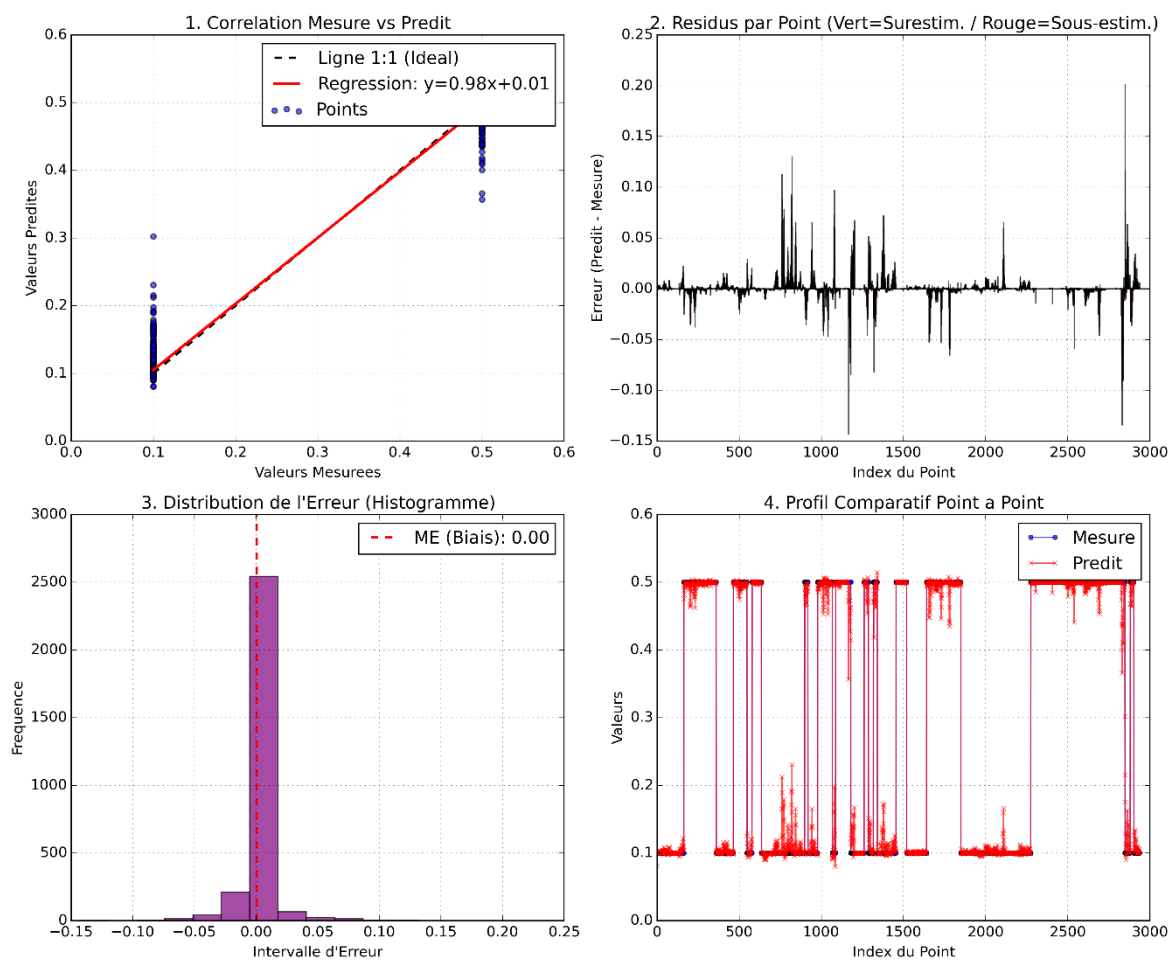
Carte isocones NO2 :



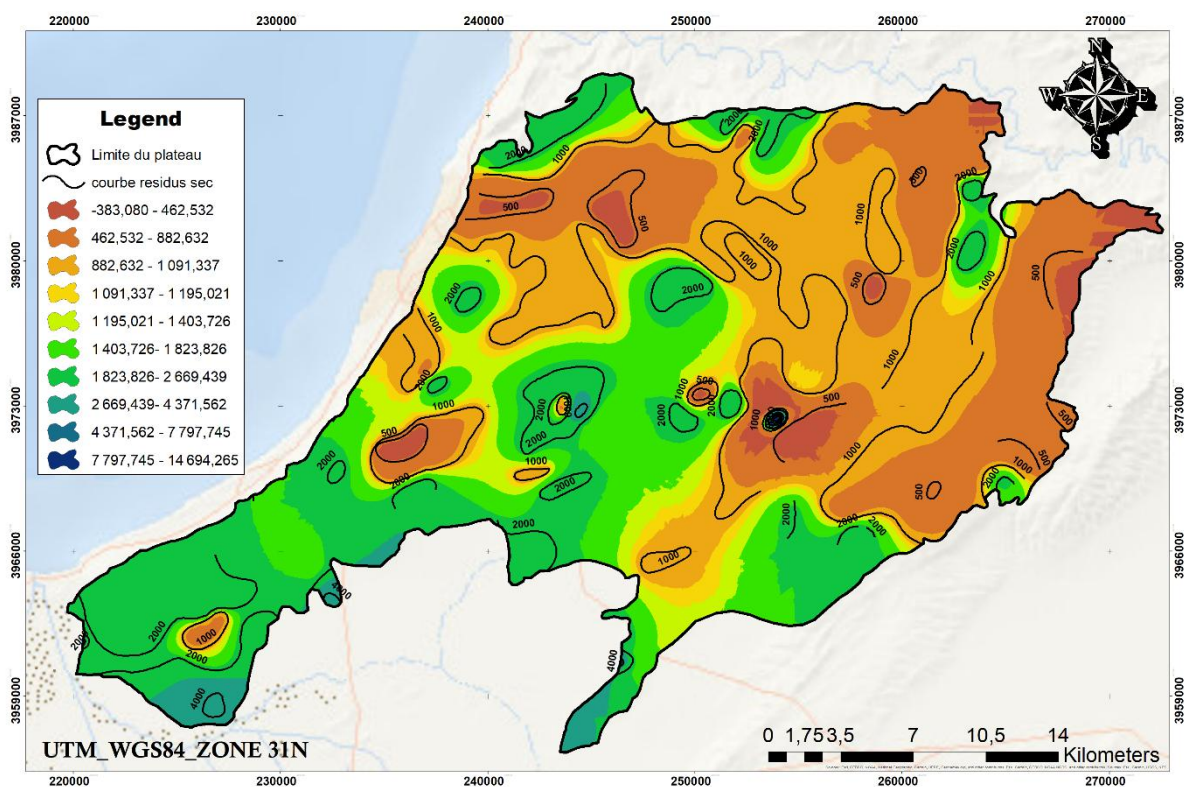
Valeur de cross validation isocones :

Paramètre	valeur
Mean error(ME)	0.0004
Mean absolute error (MAE)	0.0053
Mean squared error (MSE)	0.0002
Root mean squared error (RMSE)	0.0139
Equation de la droite	$Y=0.977*X + 0.007$

Rapport Complet de Validation Croisee - RBF Multiquadric



Carte résidus sec :



Valeur de cross validation residus sec :

Paramètre	valeur
Mean error(ME)	0.4738
Mean absolute error (MAE)	19.2876
Mean squared error (MSE)	8677.9212
Root mean squared error (RMSE)	93.1554
Equation de la droite	$Y=0.981 \cdot X + 29.158$

Rapport Complet de Validation Croisee - RBF Multiquadratic

