



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : Génie Civil et d'Architecture

DÉPARTEMENT : Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Ghefafia Kaltoum

DOMAINE : Sciences et technologies.

FILIERE : Hydraulique

OPTION : Ressources Hydrauliques

Thème

**ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE LES MÉTHODES
D'INTERPOLATION SPATIALE POUR LA CARTOGRAPHIE
DES PRÉCIPITATIONS : APPLICATION AU BASSIN
VERSANT DU CHOTT HODNA (ALGÉRIE DU NORD)**

Application aux bassin-versant du Chott Hodna (Algérie du Nord)

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	qualité
CHETIH Mohamed	Président
BOUACHE Mohamed	Examineur
GUIDOUM Azeddine	Rapporteur

Promotion : Juin - 2019

Remerciements

Tout d'abord, tout louange à dieu qui m'a fourni le courage, la capacité et la patience pour réaliser ce modeste travail avec toutes ses difficultés et ses obstacles.

Je remercie fortement mon promoteur : Mr. GUIDDOUM Azzadine de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail, ainsi pour sa disponibilité, ses conseils ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mon respect s'adresse aux membres de jury « Mr. CHETIH Mouhamed, et Mr. BOUACHE Mouhamed ». Qui me feront l'honneur d'apprécier ce travail.

Je remercie Pr.CHETIH Mohamed, Pr.DJEHICHE Abdelkader et GARREF Salah professeur à l'Université de Djelfa et Younsy Djihad à l'ANRH de Djelfa pour leur aide dans la collecte des données Sans oublier de remercier tous mes enseignants, Mr. AMIRAT Ahmed.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis et les membres de ma famille qui m'ont toujours encouragé.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Ghefajia Kaltoum 2019

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A chaque étudiants qui a répondu a l'appel de Allah et a prié le prophète mohammed et qui les gents bénéficient de ces connaissances

A mes plus chers parents du monde que dieu les garde et les protège merci de m'encourager et de me donner la force pour finir ce modeste travail ; merci pour tout vos sacrifices pour que vos enfants grandissent et prospèrent. Merci d'être tout simplement mes parents

C'est à vous que je dois cette réussite, Et je suis fière de vous l'offrir avec tous mes vœux de bonheur, santé et de réussite

A Mon frère, le bijou de la famille et le guide de mon droit chemin abou bakeur elsadik ; je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde. A mes adorable jolie sœurs : maroua ; samia et farah hiba allah

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de L'affection que je porte pour vous. que allah vous garde

A la mémoire de mes grands pères et ma grande mère J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

A mon cher oncle kouider et tout membre de sa jolie famille

À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses a mes chers cousins cousines et toute la famille Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A lamie de mon chemin et ma sœur depuis l'enfance sarra

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A toutes les personnes ceux qui m'ont appris le chemin de la science du début à la fin de nos jours soumia labyadh; hadjer kadri; imen ben arousetc

A toutes ces personnes je dédie modeste travail et je conclus le dédicace par les paroles d'allah

﴿ اِفْرَأْ بِاِسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ * خَلَقَ الْاِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ * اِفْرَأْ وَرَبُّكَ الْاَكْرَمُ * الَّذِي عَلَّمَ

بِالْقَلَمِ * عَلَّمَ الْاِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ ﴾ العلق: 1 - 5

ملخص :

عادة ما تكون الخريطة ذات الخطوط متساوية القيمة المطرية هي النتيجة المرئية لعملية الاستيفاء المكاني وفي الواقع عملنا هذا يتعلق برسم خريطة متوسط هطول الأمطار السنوي الخاصة بحوض شط الحضة الواقع في وسط شمال الجزائر للفترة الممتدة بين 1975 و 2017 . التقنية المعتمدة في هذه الدراسة هي النمذجة الإحصائية التي مكنتنا من تقدير هذا العامل المناخي وفقا للمتغيرات الجغرافية والطبوغرافية لحوض الدراسة. لأجل هذا قمنا بتطبيق طريقة الارتداد أو الارتجاع المتعدد، كما تم التأكد من صحة النتائج والمصادقة عليها باستخدام ومقارنة نماذج الاستيفاء المختلفة. اعتمادا على نتائج التحقق والمصادقة المتحصل عليها، وقع اختيارنا على تقنية كريجنج الاحتمالية لتمثيل التوزيع الجغرافي لكمية الأمطار المتوسطة لحوض الحضة، الدقة الإجمالية المعبر عنها بواسطة قيمة الخطأ التربيعي المتوسط هي 7,12 ملم.

الكلمات المفتاحية: الجزائر، الحوض التجميعي، رسم الخرائط، شط الحضة، الاستيفاء المكاني، المطر.

Abstract:

A map with isolines is usually the visual outcome of the process of spatial interpolation. Indeed, the present work concerns a mapping of average annual rainfall in the Chott Hodna basin located in the center of northern Algeria for the period 1975-2017. The technique adopted is the statistical modeling that allowed us to estimate the so-called climatic factor according to the geo-topographic variables. The multiple regression method was applied and the results were interpolated using and comparing different interpolation models. At the end of the validation results, the stochastic Kriging technique was chosen to represent the spatial distribution of the Hodna mean rain. The overall accuracy given by the value of the mean squared error is 7.12 mm.

Key words: Algeria, watershed, cartography, Chott Hodna, spatial interpolation, rain.

Résumé :

Une carte présentant des isolignes est généralement l'aboutissement visuel du processus de l'interpolation spatiale. En effet, le présent travail porte sur une cartographie des pluies moyennes annuelles dans le bassin de Chott Hodna situé au centre de l'Algérie septentrionale pour la période 1975-2017. La technique adoptée est la modélisation statistique qui nous a permis d'estimer le dit facteur climatique en fonction des variables géo-topographiques. La méthode de régression multiple a été appliquée et les résultats ont été interpolés en utilisant et en comparant différents modèles d'interpolation. A l'issue des résultats de la validation, la technique stochastique dite Krigeage a été retenue pour représenter la distribution spatiale de la pluie moyenne du Hodna. La précision globale donnée par la valeur de l'erreur quadratique moyenne est de 7,12 mm.

Mots clés : Algérie, bassin versant, cartographie, Chott Hodna, interpolation spatiale, pluie.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : Description du domaine d'étude et structuration des données	
I-1 Rappel sur la géostatistique et l'interpolation spatiale	3
I-1-1 Principe de la géostatistique	3
I-1-2 Méthodes d'interpolation spatiale	3
1-2-1 Les méthodes déterministes (empiriques/mécaniques)	3
a. La méthode du plus proche voisin.....	4
b. La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW)	5
c. La méthode de triangulation irrégulière (TIN).....	5
d. La méthode Spline	6
1-2-2 Les méthodes stochastiques (probabilistes)	7
- Le krigeage	7
I-2 Description des éléments physio-géographique du domaine d'étude	11
I-2-1 Situation géographique	11
I-2-2 Morphométrie et relief	12
I-2-3 Géologie	12
I-2-4 Réseau hydrographique et occupation des sols	13
I-3 Structuration de la base de données du domaine d'étude	16
I-3-1 Modèle Numérique de Terrain (MNT).....	16

I-3-2	Distance à la mer	16
I-3-3	Les données pluviométriques de base	17
a.	Homogénéisation des données	20
b.	Comblement des lacunes	20
c.	Les variations spatiales et temporelles des précipitations annuelles	20
d.	Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers	28
Chapitre II : Analyse cartographique et interprétations		34
II-1	Régression multiples et prédiction des précipitations	34
II-1-1	principe	34
II-1-2	Pluie moyenne annuelle	35
II-1-3	Variables explicatives	35
a.	Latitude et longitude	36
b.	Altitude	36
c.	Distance à la mer	36
II-1-4	Corrélation et validation des modèles régressifs	40
II-2	Applications des méthodes d'interpolation à la cartographie des précipitations	42
II-2-1	Méthode déterministes.....	42
II-2-2	Méthode géostatistiques (le krigeage)	44
II-3	Analyse comparative des résultats	61
II-4	Interprétation des cartes obtenues et caractérisation spatiale des précipitations ...	68
Conclusion.....		70
Références bibliographiques		
Annexes		

Liste des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques morpho-hydrographiques des 24 sous bassins du Hodna	15
Tableau I.2 (a)	Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes.	26
Tableau I.2 (b)	Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes.	27
Tableau I.3 (a)	Caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles aux postes pluviométriques retenus pour l'étude.	31
Tableau I.3 (b)	Caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles aux postes pluviométriques retenus pour l'étude.	32
Tableau I.4	Répartition saisonnière des pluies dans les stations retenues dans l'étude.	33
Tableau II.1	Résultats de la régression multiple : pluies annuelles - paramètres explicatifs.	
Tableau II.2 (a)	Erreur quadratique moyenne et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques "test" pour chacune des méthodes d'interpolation spatiale : Équation de régression (1).	64
Tableau II.2 (b)	Erreur quadratique moyenne et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques "test" pour chacune des méthodes d'interpolation spatiale : Équation de régression (1).	65
Tableau II.3 (a)	Erreur quadratique moyenne et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques "test" pour chacune des méthodes d'interpolation spatiale : Équation de régression (2).	66
Tableau II.3 (b)	Erreur quadratique moyenne et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques "test" pour chacune des méthodes d'interpolation spatiale : Équation de régression (2).	67

Liste des figures

Figure I.1	Découpage en polygones de Thiessen .	4
Figure I.2	Pondération inverse à la distance.	5
Figure I.3	Création d'un réseau triangulaire.	6
Figure I.4	Notations sur les splines.	6
Figure I.5	Éléments d'un modèle de variogramme.	9
Figure I.6	Modélisation du semi-variogramme estimé en vue du krigeage.	10
Figure I.7	Localisation du bassin du Chott Hodna.	11
Figure I.8	Géologie du Hodna au 1/500.000, 1952 adaptée.	14
Figure I.9	Position des 44 stations pluviométrique et MNT couvrant le bassin d'étude.	18
Figure I.10	Distance à la mer.	19
Figure I.11	Précipitations moyennes interannuelles observées dans les 44 postes pluviométriques.	21
Figure I.12	Coefficient de variation interannuelle.	22
Figure I.13 (a)	Evolution interannuelles des précipitations.	22
Figure I.13 (b)	Evolution interannuelles des précipitations.	23
Figure I.13 (c)	Evolution interannuelles des précipitations.	24
Figure I.14 (a)	Variations moyennes mensuelles des précipitations.	29
Figure I.14 (b)	Variations moyennes mensuelles des précipitations.	30
Figure II.1	Estimation de l'altitude lissée (Zliss).	37
Figure II.2	Corrélations pluie annuelle, latitude, longitude, altitude et distance à la mer.	37
Figure II.3	Pluie moyenne annuelle en fonction de la latitude et la longitude	38
Figure II.4	Pluie moyenne annuelle en fonction de l'altitude et de la distance à la mer.	39
Figure II.5	Régression entre les \overline{Pa} estimées et \overline{Pa} observées sur 44 postes pluviométriques.	41
Figure II.6	Méthodes interpolation implémentées dans SURFER 9.	42
Figure II.7	Étapes de réalisation de la cartographie des pluies annuelles pour l'approche déterministe.	43
Figure II.8	Polygonation de Thiessen pour le bassin de Chott Hodna.	43
Figure II.9	Variogrammes des résidus de régression (moyennes des racines carrées de pluies annuelles).	46

Figure II.10	Etapes de réalisation de la cartographie des pluies annuelles pour l'approche géostatistique .	47
Figure II.11	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna(1975 - 2017) : Méthode de la Puissance Inverse des Distance .	48
Figure II.12	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de krigeage (Approche déterministe).	49
Figure II.13	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de Shepard Modifiée.	50
Figure II.14	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de Régression Polynomiale.	51
Figure II.15	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode polynomiale locale.	52
Figure II.16	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de la Courbure Minimale.	53
Figure II.17	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de la Moyenne Mobile.	54
Figure II.18	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode du Voisin Naturel.	55
Figure II.19	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode du Plus proche voisin.	56
Figure II.20	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017) : Méthode de Fonction à base radiale.	57
Figure II.21	Etablissement de la cartes des pluies annuelles (1975-2017) : Équation (1).	58
Figure II.22	Etablissement de la cartes des pluies annuelles (1975-2017) : Équation (2).	59
Figure II.23	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 – 2017) : Méthode de Krigeage (Approche stochastique), Équation (1).	60
Figure II.24	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 – 2017) : Méthode de Krigeage (Approche stochastique), Équation (2).	60
Figure II.25	Répartition géographique des postes pluviométriques « test »	61
Figure II.26	Schéma explicatif des étapes de la validation des résultats de l'interpolation spatiale.	62
Figure II.27	pluviométrique du Hodna au 1/1.000.000.	68
Figure II.28	Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017).	69

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

MNT: Modèle numérique du Terrain.

ONM: Office météorologique national.

N_{sbv} : Numéro du sous bassin versant .

S : Superficie du sous bassin en km² .

P : Périmètre du sous bassin en km .

L_{ch} : Longueur du chevelu hydrographique en km .

L : Longueur du rectangle équivalent en km .

i : largeur du rectangle équivalent en km .

D_d : densité de drainage (hydrographique) en km/km² .

H_{min}, H_{max} et H_{moy} : Altitudes caractéristiques du sous bassin en m.

INTRODUCTION

GENERALE

[وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ]

* الانبياء- ايه 30 *

« *Et nous avons désigné (créé) de l'eau tout être vivant. Ne croiront-ils pas ?* »

Coran : Les prophètes (Al-Anbiya) 30

« **And we made from water every living thing Will they not then believe?** »

Quran: The Prophets (Al-Anbiyaa) 30

Les mesures de pluie directes au sol provenant d'un réseau de pluviomètres sont ponctuelles. Elles sont avant tout une valeur indicative du volume de pluie recueilli en un point spécifique. Pour des opérations d'aménagement, de gestion des eaux et de prévention des risques, cette connaissance spatiale discrète est insuffisante, ou peu évidente à visualiser. Le recours donc à des informations climatiques continues dans l'espace est devenu une nécessité et les valeurs observées requièrent donc d'être interpolées dans l'espace si l'on souhaite connaître avec précision la pluie « surfacique » (Comby J. et Renard F., 2006). Une carte présentant des isohyètes est généralement l'aboutissement visuel de ce processus d'interpolation.

Les méthodes d'interpolation pour la spatialisation de la pluie sont nombreuses et la sélection d'une méthode ou d'une autre est généralement conditionnée par la représentativité espérée des résultats que l'on obtiendra. En plus, l'amplitude des écarts observée entre ces derniers d'interpolation est également fortement conditionnée par les caractéristiques du territoire étudié et notamment la taille, la configuration et la densité du réseau d'observation.

En Algérie, les expériences en matière de cartographie pluviométrique sont généralement entreprises à une échelle globale ne reflétant que partiellement la diversité et les spécificités climatiques de certaines régions du pays.

En testant et en comparant différentes méthodes d'interpolation spatiale, déterministe ou stochastique, cette étude propose de déterminer la méthode la plus adaptée au bassin du Chott Hodna, en termes de représentativité cartographique de la pluie moyenne interannuelle pour la période (1975-2017) avec pour finalité une meilleure connaissance de la répartition spatiale de ce paramètre climatique.

La technique de cartographie automatique, à travers la modélisation statistique et en se basant sur la corrélation existante entre les précipitations et les variables explicatives géo-

topographiques, qui a donné des résultats satisfaisants dans les régions méditerranéennes (Ghallab, 2015) et s'avère donc la plus utile pour notre travail.

L'évaluation de la précision des résultats obtenus pour les pluies moyennes annuelles a été effectuée via le calcul de l'erreur absolue (EMA) et de l'erreur quadratique moyenne (EQM). Ces tests ont permis de montrer la contribution de la composante stochastique à l'amélioration des résultats d'interpolation.

La démarche adoptée comporte deux (2) étapes :

La première partie traite du cadre général, elle sera consacrée à la présentation de la zone d'étude, à la description du contexte physio-géographique (morphométrie, hydrographie, géologique, occupation des sols et climat). Elle consiste également en cartographie de ces descripteurs physiques du bassin qui influencent le processus hydrologique.

La seconde partie vise l'analyse cartographique des précipitations selon plusieurs méthodes d'interpolation, afin de choisir la méthode la plus adéquate pour notre territoire d'étude. Cette analyse repose également sur l'application de la méthode de régression statistique multiple pour caractériser la répartition spatiale des précipitations en fonction des paramètres topographiques explicatives de ces dernières.

Ce travail va être piloté par les logiciels Mapinfo 6.5, Vertical Mapper 3.0, ENVI 4.3, Surfer 9.0 Global mapper 11.0, Hydrolab 98.2 et Minitab 13.0

Chapitre I

Description du domaine d'étude et structuration des données

I-1 Rappel sur la géostatistique et l'interpolation spatiale

La géostatistique, qui constitue une branche très importante de la statistique spatiale, s'applique à de nombreux domaines où la connaissance de la distribution spatiale de phénomènes est importante : altimétrie, géologie, météorologie,..., etc. elle constitue notamment, une approche détaillée pour analyser la structure spatiale de la pluviométrie.

I-1-1 Principe de la géostatistique

Selon [Matheron \(1965\)](#) «La géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et l'estimation des phénomènes naturels ».

On peut dire que la géostatistique est une discipline fondée sur l'analyse des corrélations spatiales d'un phénomène ([Bourgine, 1996](#)). Prenant, à titre d'exemple, la pluviométrie d'un champ : la géostatistique met en évidence la relation statistique existant entre la pluie observée (mesurée) en un poste (P1) et celle observée en un autre (P2) pour une distance (h) donnée entre les deux postes.

Par variation de la distance (h), en comparant de tous les couples de postes disponibles, la loi statistique de variation du phénomène (la pluviométrie) peut être déduite. Sa mise en évidence expérimentale puis sa modélisation par une fonction de corrélation permettent de résoudre toute une gamme de problèmes liés à ce phénomène dont l'interpolation et la quantification des erreurs associées.

I-1-2 Méthodes d'interpolation spatiale

L'interpolation spatiale permet à l'aide de fonctions mathématiques d'estimer des valeurs caractérisant un phénomène (ex : la pluviométrie) en tous points ou nœuds d'une grille régulière superposée à un domaine d'étude (ex : bassin versant) sur la base de mesures ponctuelles et dispersées.

Les méthodes d'interpolation spatiale couramment utilisées jusqu'à récemment en matière de cartographie sont multiples, elles peuvent être classées en deux catégories de manière générale ([Despaigne W, 2006](#)) :

1-2-1 Les méthodes déterministes (empiriques/mécaniques)

Les techniques d'interpolation déterministes comme Spline, polynomiale, inverse de la distance (IDW) et la triangulation permettent de créer des surfaces à partir de points mesurés, en fonction du degré de similarité ou du degré de lissage. Elles considèrent la variabilité

régionale par une fonction aléatoire en assumant que les observations sont faites sans erreurs (Kurtzman et Kadmon, 1999). Une interpolation déterministe peut forcer la surface résultante à passer ou non par les valeurs de données.

La technique d'interpolation qui prévoit une valeur identique à la valeur mesurée à un emplacement échantillonné est connue sous le nom d'interpolateur exact. Un interpolateur inexact prévoit une valeur différente de celle qui est mesurée. Il permet d'éviter les pics abrupts ou les dépressions dans la surface en sortie. Une brève description des principes de chacune de ces méthodes est proposée ci-dessous :

a. Méthode du plus proche voisin

La méthode polygonale du plus proche voisin (nearest neighbor) ou interpolation arrondi, consiste à attribuer à chaque point cible une combinaison des valeurs des points sources les plus proches de son antécédent par la transformation inverse. C'est une interpolation polynomiale d'ordre zéro. L'interpolation par Plus Proches Voisins est basée sur un réseau de polygones de Voronoï. Par exemple, la méthode de Thiessen s'appuie sur la loi du plus proche voisin. Elle fait appel à la propriété géométrique pour déterminer la région d'influence. Pour tous les points d'observation du champ, on définit un polygone d'influence tel que chaque point du polygone est plus proche du point d'observation que de tout autre site. En analyse pluviométrique, cette méthode convient dans les systèmes très hétérogènes et peu efficace lorsque la topographie du bassin est irrégulière puisque la définition de chaque zone ne tient pas compte de ce paramètre (Bossier P, 2012).

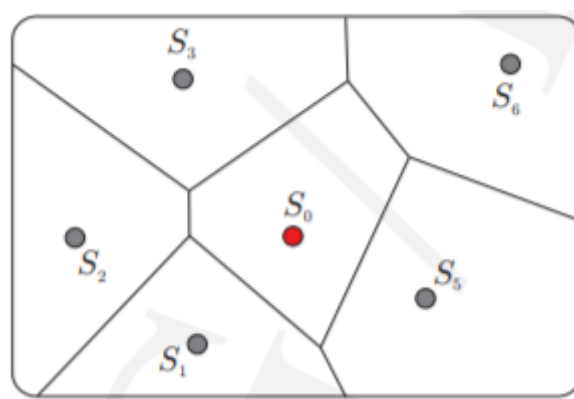


Figure I.1: Découpage en polygones de Thiessen

b. La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW)

"Inverse Distance Weighted" est une technique d'interpolation déterministe qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondérées par l'inverse de la distance élevée à une puissance mathématique au point calculé. Plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte. Cette méthode estime que les points plus proches de l'emplacement à calculer auront plus d'influence (poids). Elle permet de créer une surface continue (raster) à partir de données discrètes (points) en calculant la valeur et la proximité des points aux alentours.

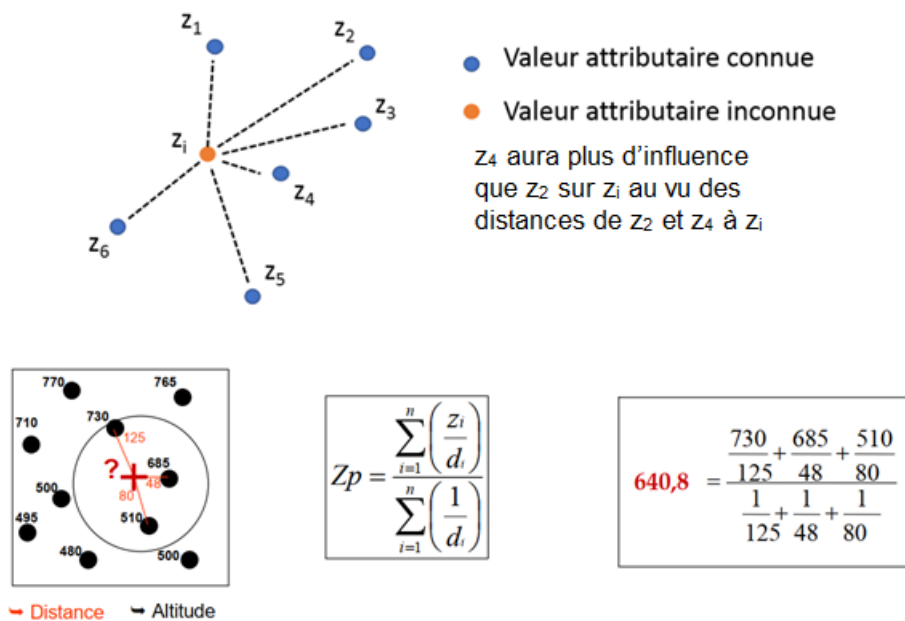


Figure I.2: Pondération inverse à la distance.

c. La méthode de triangulation irrégulière (TIN)

L'approche par TIN (Triangular Irregular Networ) s'appuie sur la construction d'un réseau triangulaire basé sur la position spatiale des échantillons disponibles. Plusieurs méthodes de triangulation peuvent être utilisées mais celle de Delaunay est la plus utilisée. Cette méthode a pour objectif de créer des triangles qui ne se chevauchent pas et dont le cercle passe par les trois sommets donnant naissance au triangle. Une fois que le réseau est opérationnel, chaque nouvelle observation pour laquelle une nouvelle valeur attributaire doit être prédite, est associée à un triangle dans lequel cette observation se trouve. Cette valeur attributaire est calculée en pondérant les valeurs attributaires des sommets du triangle.

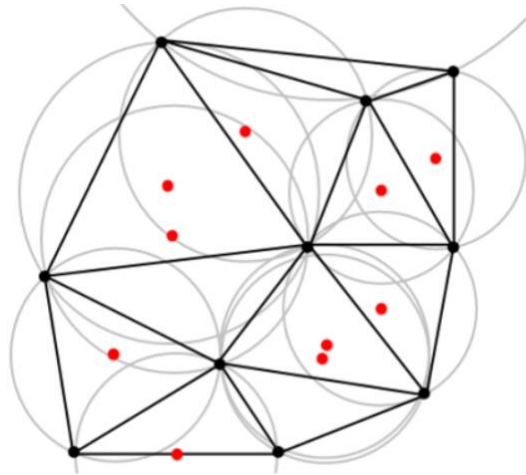


Figure I.3: Création d'un réseau triangulaire

d. La méthode Spline

Cette méthode permet d'interpoler par morceaux une surface à partir de points en utilisant une technique de Spline de courbure minimum. Elle consiste à faire passer une ligne par les points de voisinage tout en minimisant la courbure de la surface. Le voisinage est défini par les points les plus proches.

Le spline (cerce en français) est typiquement utilisé pour créer des lignes de contour à partir de données denses et régulièrement espacées, mais il n'est pas conseillé s'il y a une forte irrégularité de données, dans une distance horizontale limitée (Diallo, 2008).

Plus formellement, une spline est une fonction $f(x)$ définie par morceaux sur un intervalle $[x_0; x_n]$. Au $i^{\text{ème}}$ sous-intervalle $[x_i; x_{i+1}]$ est défini un morceau de la spline que nous noterons $f_i(x)$.

Chaque fonction $f_i(x)$ est un polynôme devant vérifier les conditions d'interpolations $f_i(x) = y_i$ et $f_{i+1}(x) = y_{i+1}$

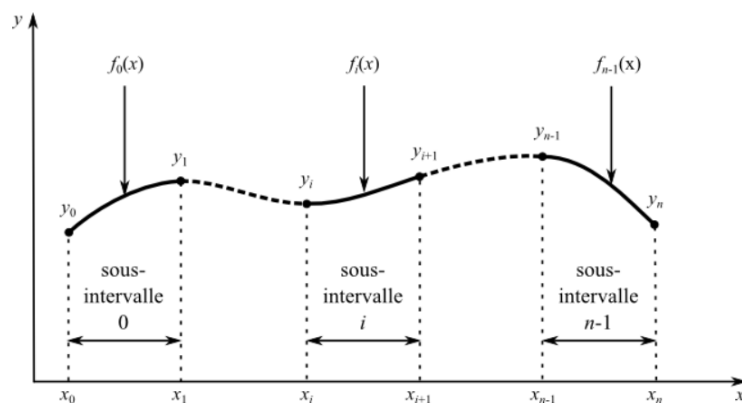


Figure I.4: Notations sur les splines

1-2-2 Les méthodes stochastiques (probabilistes)

Les méthodes probabilistes (telles que la méthode de krigeage) sont basées sur des modèles statistiques. Elles reposent sur le principe de l'autocorrélation spatiale (relation statistique entre les points mesurés) qui préconise que les observations rapprochées dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Ces méthodes font alors appel à des modèles découlant de l'analyse statistique des données considérées. On parle alors de techniques géostatistiques (Bossler, 2012).

Les méthodes dites stochastiques prennent en compte l'aspect aléatoire de la surface résultante. Le résultat obtenu est considéré comme une des surfaces pouvant être potentiellement obtenues parmi plusieurs possibilités. En partant du principe qu'avec les mêmes points de départ et la même méthode, il est possible d'avoir plusieurs résultats acceptables.

Le krigeage est l'approche géostatistique la plus utilisée pour réaliser des interpolations spatiales.

Le krigeage et le cokrigeage, basés sur cette théorie, expriment les variations spatiales de variables en termes de variogrammes et ils minimisent les erreurs de prédiction qui sont elles-mêmes estimées.

- **Le krigeage**

Le krigeage dérive son nom de l'ingénieur minier sud-africain (Krige, 1951) qui dans les années cinquante a commencé à appliquer ce type d'interpolation aux recherches minières. Cependant, le terme *krigeage* et le formalisme de cette méthode sont dus au français (Matheron, 1963). En fait, les fondements de la méthode ont été développés parallèlement par d'autres chercheurs, mais c'est aujourd'hui sous la terminologie proposée par Matheron qu'elle est la plus connue (Baillargeon, 2005).

C'est la première méthode d'interpolation spatiale qui permet d'estimer la valeur d'un site à partir des valeurs observées dans les sites avoisinants, en prenant en compte leur configuration géométrique et la structure spatiale de la régionalisation.

La méthode exprime les variations spatiales de variables en termes de variogrammes et ils minimisent les erreurs de prédiction qui sont elles-mêmes estimées. L'objectif est de comprendre les relations existantes entre les observations séparées par des distances différentes dans l'espace. Toute cette information est prise en compte par le variogramme.

On distingue 3 formes de krigeage uni varié (à une seule variable) : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. La différence entre ces formes d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler.

Le krigeage simple : Krigeage stationnaire à moyenne constante et connue sur tout le domaine.

Le krigeage ordinaire (ponctuel): Krigeage stationnaire à moyenne constante et inconnue (mais définie). C'est le plus fréquemment utilisé.

Le krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance), à moyenne souvent inconnue, non-constante et suit par exemple un modèle de régression spatiale.

Le variogramme

Le variogramme c'est l'outil fondamental en géostatistique pour analyser et modéliser la structure spatiale de la variable régionalisée. Il représente la variabilité moyenne des concentrations entre deux points en fonction de la distance (h) qui les sépare et permet également de détecter les points d'anomalie par leur position par rapport aux autres.

Nous allons mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$ en calculant une mesure de dissemblance entre deux données (z_1) et (z_2) situées en deux points (x_1) et (x_2) d'un domaine spatial. Cette dissemblance entre deux valeurs, désignée par (γ), vaudra $\gamma = (z_1 - z_2)^2 / 2$, c'est-à-dire la moitié du carré de la différence entre deux valeurs. On fait dépendre la dissemblance (γ) de la distance et de l'orientation d'une paire de points, décrits par le vecteur $h = (x_1 - x_2)$, indifféremment de la position de la paire dans le domaine étudié (Chini, 2009).

$$\gamma(h) = 1/2 [z(x_1 + h) - z(x_1)]^2$$

La **Figure I.5** présente le variogramme expérimental et le modèle de variogramme ajusté aux données.

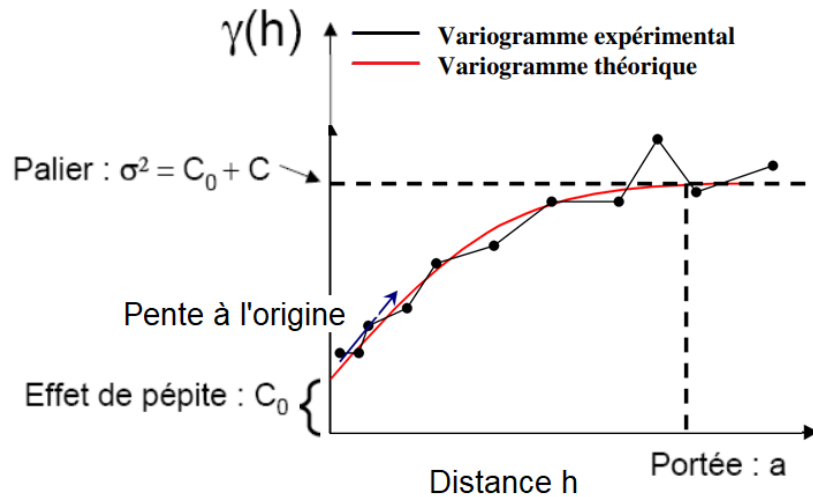


Figure I.5 : Éléments d'un modèle de variogramme

Portée (Range: a) : Distance (h) où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire. Elle représente l'échelle de l'hétérogénéité du processus.

Palier (Sill: $\sigma^2 = C_0 + C$) : Il s'agit de la valeur limite du variogramme pour de grandes valeurs de (h). Comme le palier n'est atteint qu'asymptotiquement alors la portée réelle est infinie. C'est pour cela qu'on désigne une portée pratique.

Effet de pépité (Nugget Effect: C_0) : Un effet de pépité s'explique par des Variations non détectées à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique. Il représente une discontinuité du variogramme à l'origine et traduit une forte irrégularité du processus des variations locales.

On estime le variogramme à l'aide de :

$$\gamma_{\#}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Où $N(h)$ nombre de paires dont les points sont espacées de (h)

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques :

$$\gamma_{\theta}(h) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Où (h, θ) : nombre de paires séparées de (h) dans la direction θ .

En pratique on s'accorde une tolérance sur (h) et sur θ afin d'avoir suffisamment de paires pour chaque (h) et chaque (θ) .

Pour chacune des classes ainsi formées, on calcule la distance moyenne séparant les extrémités des paires (abscisse) et on évalue le variogramme expérimental pour chaque classe. On obtient donc une série de points expérimentaux auxquels on cherche à ajuster un modèle permettant de déduire la covariance entre deux points quelconque en fonction de leur espacement géographique (et, éventuellement, de la direction qu'ils définissent). Une fois le modèle adopté, toute la suite des calculs se fait avec les valeurs obtenues du modèle et non avec les valeurs expérimentales (Chini, 2009).

Une fois que le variogramme expérimental est établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux. Les modèles théoriques sont des expressions analytiques que l'on tente d'ajuster le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux, les plus courants sont présentés ci-dessous :

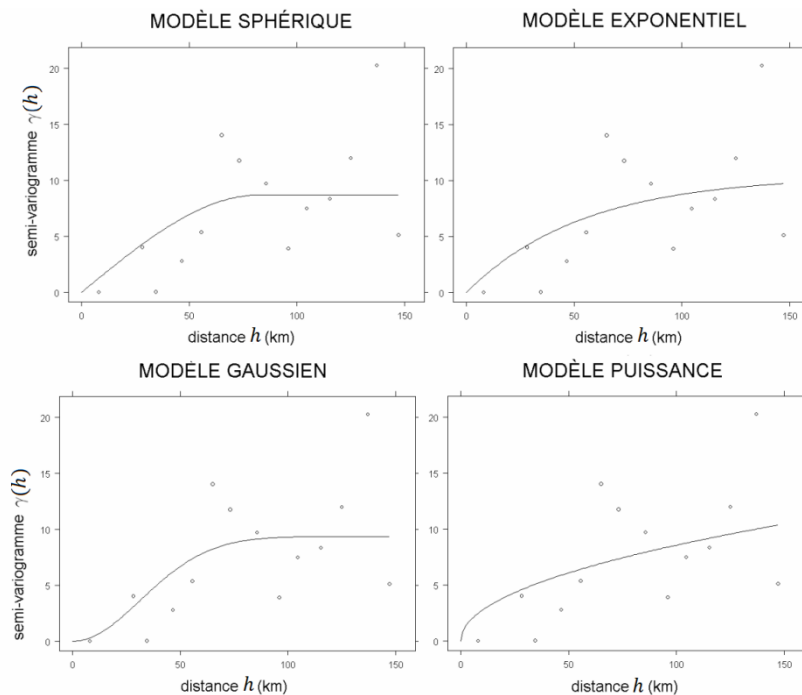


Figure I.6: Modélisation du semi-variogramme estimé en vue du krigeage (Baillargeon S, 2005)

I-2 Description des éléments physio-géographique du domaine d'étude

Cette section est consacrée à une description générale du bassin versant du Hodna afin de déterminer les caractéristiques physico-graphiques, bases indispensables à la compréhension des mécanismes mécanisme pluviométrique du bassin.

I-2-1 Situation géographique

D'une superficie de 25 840 km², Le bassin versant endoréique du Hodna est le 5^{ème} grand ensemble hydrographique Algérien. C'est une cuvette qui fait partie des hautes plaines steppiques algériennes. Il est situé au centre de l'Algérie, entre 34° 23' 17'' et 36° 09' 44" de latitude nord, et 03°11' 01" et 06° 08' 07 de longitude est. Le bassin est limité au nord par les montagnes de Bibans et le plateau Sétifien, à l'Ouest par les hautes plaines algéroises, à l'Est par les monts de Belazma, tandis qu'au sud, il est limité par les monts des Ouled Naïl et du Zab formant l'Atlas Saharien.

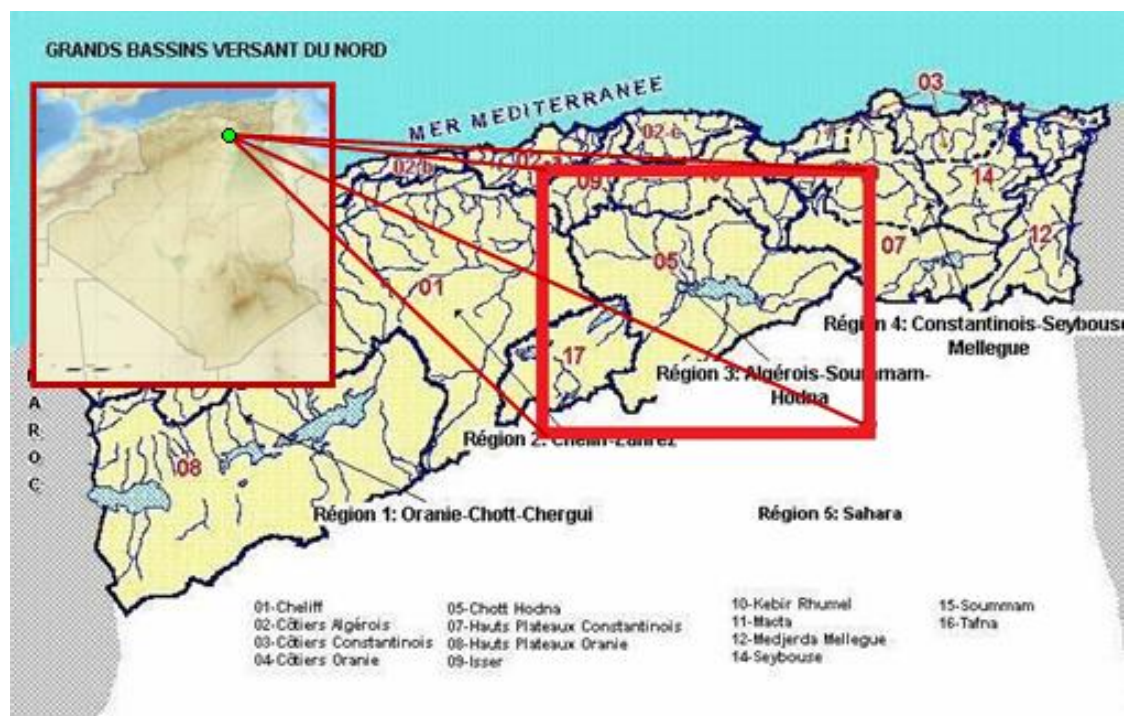


Figure I.7: Localisation du bassin du Chott Hodna

I-2-2 Morphométrie et relief

Le bassin-versant du Hodna marque la transition entre le domaine tellien au nord et le Sahara septentrional au sud. Le passage entre ces deux domaines, marqué par une succession d'ensembles montagneux (le Tell au nord, l'Atlas Saharien au sud) et de hautes plaines, favorise la diversité des milieux bioclimatiques.

Au nord du bassin, l'écran montagneux formé par la chaîne du Hodna et des monts du Titteri avec une altitude qui oscille entre 1900 et 1000 m forme en effet une véritable barrière montagneuse. Tandis qu'au Sud on trouve quelques monts de l'Atlas saharien dont les sommets peuvent atteindre les 1200 m.

Au pied de ces obstacles, la plaine du bassin versant est l'unité la plus vaste. Entre les massifs montagneux et la plaine centrale, le piedmont est constitué par de vastes glacis d'érosion parsemés de ravins (Kebiche M., 1994). Une dépression naturelle dite Chott El Hodna occupe le centre du bassin. Elle est presque plate d'une altitude de 400 m et d'une surface de 1150 km².

En somme, la configuration géographique du bassin versant du Hodna comporte selon la direction Nord-Sud :

- Le piémont s'étale entre la courbe 700 et 500 m.
- La plaine du Hodna commence de 500 à 430 m.
- Le Chott (bordure) se trouve entre 430 et 400 m.
- La Sebkha (lac salé) est entourée par la courbe 400 m.
- Le Rmel (zone sableuse) de 400 à 600 m.

I-2-3 Géologie

La géologie du bassin du Chott El Hodna est assez complexe du fait de sa position au contact de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien. Elle se caractérise par (Le Houerou et al. 1975 in : Hammou K., 2014) :

- Les formations du Quaternaire représentées par d'anciennes alluvions et des sédiments fins ;
- Les formations du Tertiaire comprenant celles de l'Eocène, de l'Oligocène continental et du Miocène sont essentiellement argilo-gréseuses forment le substratum des formations quaternaires ;
- Le cadre montagneux est constitué principalement par des formations crétacées comprenant une sédimentation calcaro-marneuse ;
- Les terrains du Secondaire formant les monts du Hodna sont surtout Crétacés (marnes, grès avec intercalation de calcaires). Ils comportent aussi, ceux du le Trias (marnes gypseuses et

sels), et du jurassique (calcaires). Dans ce secteur, les formations mio-plio-quaternaires ne sont bien développées qu'en bordures de cette chaîne.

- Le chott El Hodna est un paysage transito-accumulatif de dépôts argileux récents qui bordent la sebkha, il renferme des dépôts alluvionnaires du Quaternaire ;
- Le Trias riche en sels qui compose les roches de montagnes entourant le bassin est à l'origine des sels du Chott dissous par les eaux des précipitations .

I-2-4 Réseau hydrographique et occupation des sols

Le réseau hydrographique du Hodna est très dense et diversifié. La majorité des cours d'eau n'ont pas de débits pérennes, à l'exception des oueds Elham, Lougmane, K'sob, Soubella alimentés par des sources et retenues (ceds). A cela s'ajoute une multitude de petits cours d'eau (châaba) à sec pratiquement toute l'année et qui coulent lors des chutes et pluies.

Les divers Oueds se déversent dans la dépression du Chott El Hodna, on distingue : Oued Elham, Oued K'sob, Oued Barika, Oued Bitam, Oued Lougman, Oued Boussaâda Oued Chair et Oued ELMelh (Bencherit N, 2017). Au total, il y a au moins 22 cours d'eau permanant et temporaires qui assurent l'alimentation du Chott auxquelles il faut ajouter des sources d'eaux douces qui coulent en permanence vers le Chott.

Selon l'ANRH, le Hodna est divisé en (22) sous bassins (**Tableau I.1**) et dispose de (7) stations hydrométriques qui ne sont actuellement pas toutes exploitables.

En ce qui concerne l'occupation des sols, le bassin du Hodna, est bio-géographiquement un représentant assez particulier du milieu steppique (Bencherit N, 2017), on distingue :

- Des superficies forestières dominantes à base de Pin d'Alep et Genévrier de Phoenicie (Djebels Messaad , Medjedel, Slim, Maadhid, Hammam El Dalaa et Bou Saada) ;
- Des superficies agricoles dans la plaine de M'sila qui propice aux cultures maraîchères, aux céréales et les arbres fruitiers ;

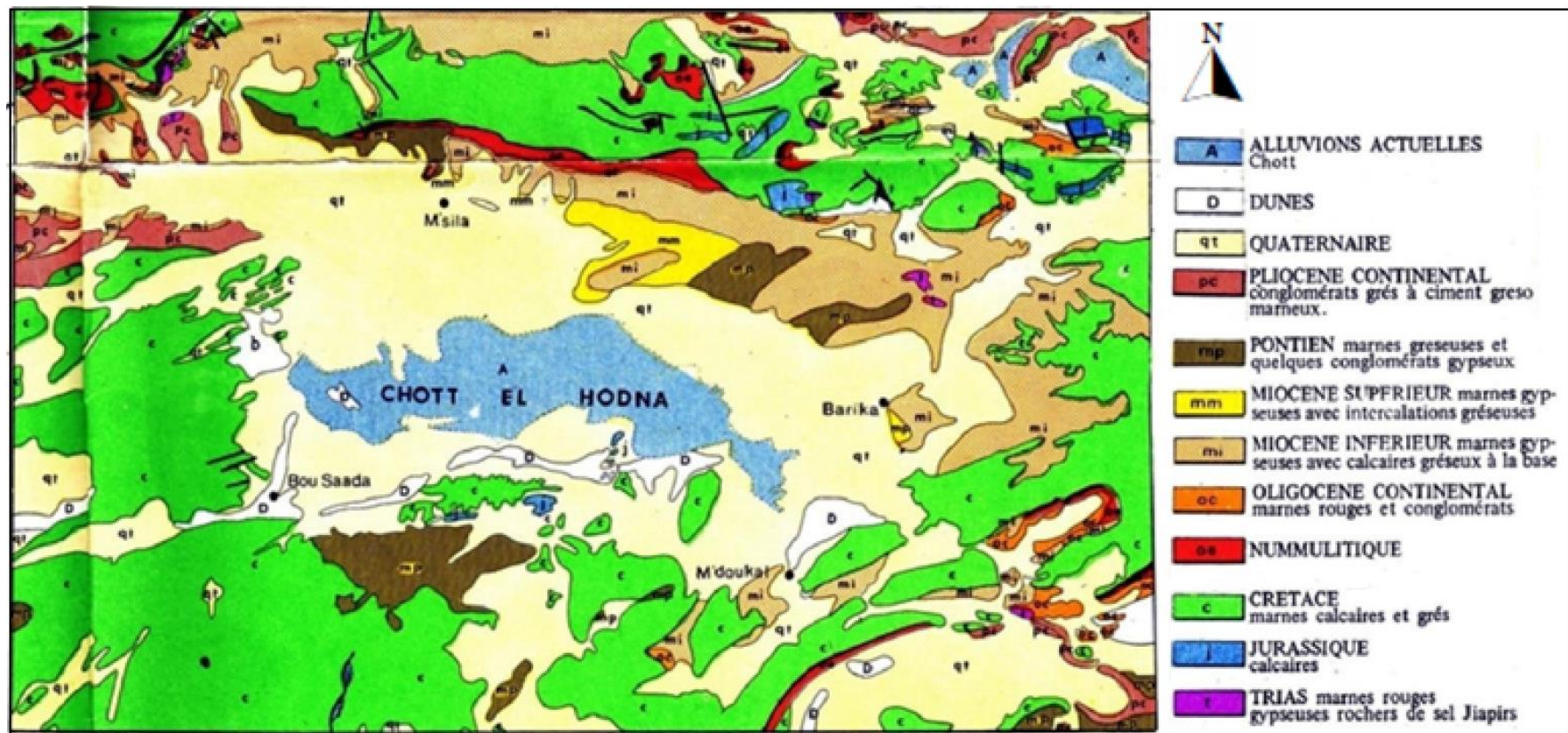


Figure I.8 : La géologie du Hodna au 1/500.000, 1952 adaptée(Le Houerou et al. 1975 in : Zedam A, 2015)

-Dans la région du Chott, on remarque des communautés steppiques constituées en majeure partie par des espèces qu'on rencontre le plus souvent dans les steppes algériennes, tel que l'Alfa et l'Armoise.

Tableau I.1 Caractéristiques morpho-hydrographiques des 24 sous bassins du Hodna

N_sbv	Oued	S (km ²)	P(km)	Lch	Kc	L (lm)	L(km)	Dd	Hmin	Hmax	Hmoy
0501	O. Ham	805,8	176,3	621,46	1,74	77,79	10,36	0,77	550	1800	1175
0502	O. Sbisseb	1851,98	226,62	906,11	1,47	93,5	19,81	0,49	550	1450	1000
0503	O. Guernini	1071,31	171,2	556,19	1,46	70,38	15,22	0,52	550	1150	850
0504	O. Djenane	860,47	183,71	653,97	1,75	81,27	10,59	0,76	500	1700	1100
0505	O. Targa	1026,94	170,81	885,72	1,49	70,93	14,48	0,86	450	1800	1125
0506	O. El Karsa	553,12	152,4	235,98	1,81	68,07	8,13	0,43	450	1100	775
0507	O. Leham	647,99	174,72	443,07	1,92	79,18	8,18	0,68	400	1250	825
0508	O. Lougmane	333,75	107,61	289,88	1,65	46,65	7,15	0,87	575	1850	1212,5
0509	O. K'sob	1471,2	205,63	1005,36	1,5	85,64	17,18	0,68	600	1850	1225
0510	O. M'Sila	2157,52	250,13	1694,23	1,51	104,4	20,67	0,79	400	1850	1125
0511	O. Soubella	1768,97	219,83	1659,68	1,46	90,33	19,58	0,94	0	1850	925
0512	O. Barika Amont	889,77	180,05	665,02	1,69	78,72	11,3	0,75	750	2100	1425
0513	O. Barika Aval	1007,05	161,12	1044,75	1,42	65,09	15,47	1,04	500	2100	1300
0514	O. Berrich	504,4	173,35	450,71	2,16	80,4	6,27	0,89	475	2100	1287,5
0515	O. Bitam-Barika	1403,02	244,37	1010,09	1,83	109,36	12,83	0,72	400	950	675
0516	O. Maiter Amont	672,74	139,3	386,44	1,5	58,06	11,59	0,57	600	1400	1000
0517	O. Bou Saâda	1035,15	194,21	643,61	1,69	84,91	12,19	0,62	600	1600	1100
0518	O. Maiter Aval	1232,86	202,3	787,52	1,61	86,98	14,17	0,64	400	1650	1025
0519	O. Aïn Rich	1130,88	163	671,28	1,36	63,76	17,74	0,59	1000	1450	1225
0520	O. Chair Amont	1597,78	208,27	956,81	1,46	85,43	18,7	0,6	800	1650	1225
0521	O. Chair Aval	877,75	163,73	539,18	1,55	69,18	12,69	0,61	600	1550	1075
0522	O. M'Sif Amont	924,2	183,5	633,29	1,69	80,23	11,52	0,69	450	1450	950
0523	O. M'Sif Aval	792,66	209,42	426,8	2,08	96,5	8,21	0,54	400	1400	900
0524	Chott Hodna	1216,81	339,48	626,18	2,72	162,24	7,50	0,51	400	400	400

I-2-5 Aperçu Climatique

Le bassin du Hodna est d'un climat aride à semi-aride caractérisé par un hiver froid des périodes de gel et un été sec et chaud. Les pluviosités annuelles sont généralement faibles, à l'exception du secteur montagneux du nord où le climat est plus pluvieux à cause de l'arrivée des vents marins.

Les précipitations sont d'une intensité très variable et très inégalement réparties avec une moyenne interannuelle de 253 mm (moyenne arithmétique de 44 postes pluviométriques pendant 42 années hydrologique : 1975/2017) associée à un coefficient de variation $C_v = 0,39$. La température moyenne annuelle est de 18 C°. L'évaporation est très forte et accentuée

par les vents soufflant du Sahara et franchissant les chainons montagneux discontinus du sud du Chott.

I-3 Structuration de la base de données du domaine d'étude

Vu le volume considérable de l'information à traiter, la construction de la base de données et son intégration dans un SIG a constitué l'étape la plus onéreuse et la plus longue de notre travail.

I-3-1 Modèle Numérique de Terrain (MNT)

La cartographie automatique des pluies nécessite un modèle numérique du terrain d'espace étudié. La **Figure I.9**, présente le modèle numérique de terrain (MNT) du bassin d'étude que nous avons utilisé. Il s'agit du MNT de la SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à 30 secondes d'arc, dont les archives peuvent être téléchargées à l'adresse suivante : <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>.

Ce MNT a été rééchantillonné, par interpolation, à la maille 1 x 1 Km², en utilisant les SIG GLOBAL MAPPER et MAPINFO. Le modèle est décrit par un quadrilatère que délimitent les méridiens 3° 6' 33" E et 6° 13' 53" E et les parallèles 34° 19' 5" N et 36° 12' 28" N et qui couvre l'ensemble du bassin d'étude.

I-3-2 Distance à la mer

Selon [Réménieras, \(1965\)](#), la distance à la mer représente la distance du poste pluviométrique à la mer dans le sens des vents pluvieux. Un poste plus proche de la mer, sera plus exposé au vent porteur de pluie. Aussi, l'atmosphère humide que crée la mer dans son entourage favorise les précipitations ; la pression de saturation est

Figure I.9: Position des 44 stations pluviométrique et MNT couvrant le bassin d'étude

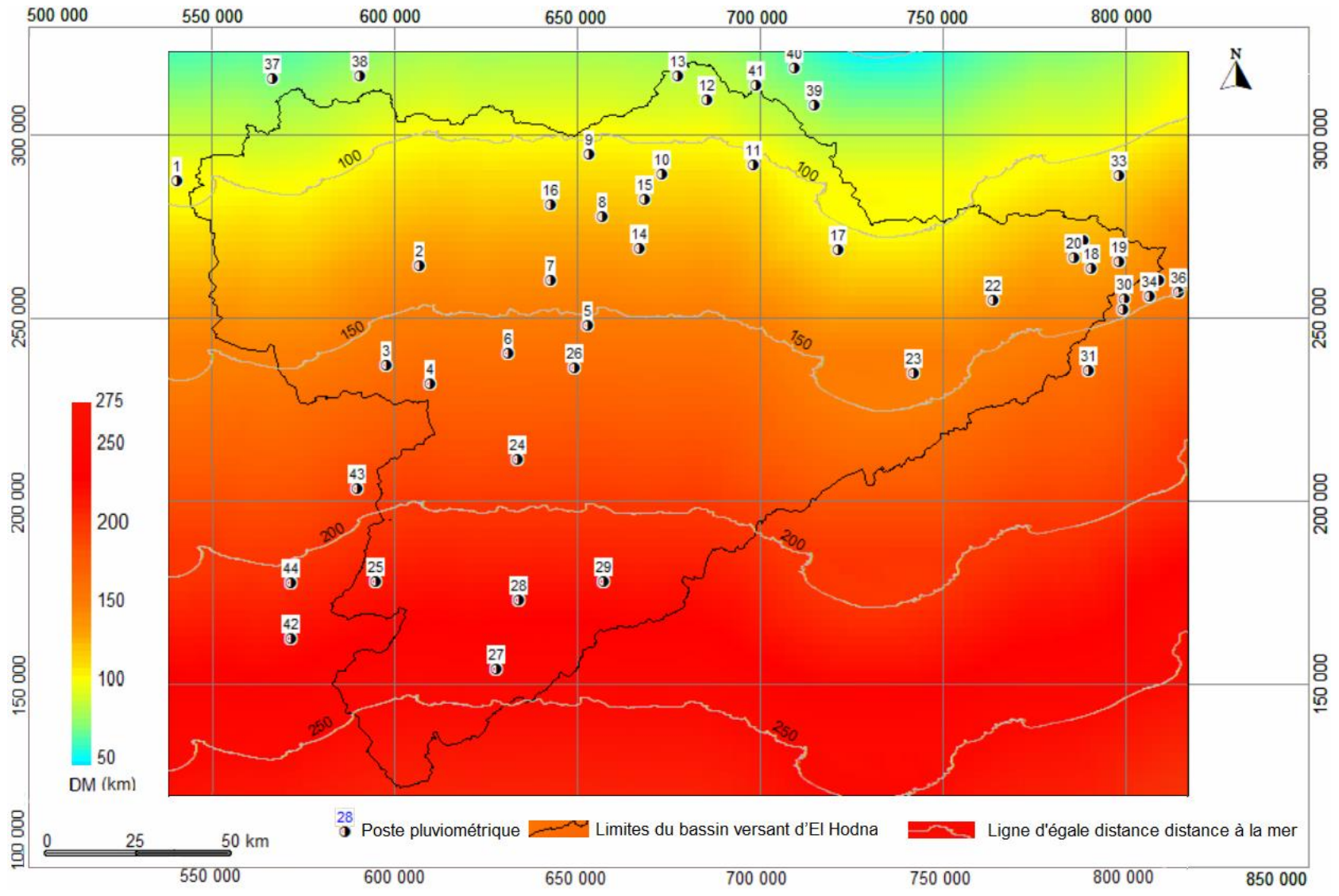


Figure I.10: Distance à la mer

a- Homogénéisation des données

L'analyse statistique des séries pluviométriques, exige une homogénéité de leurs composantes. Il est donc nécessaire, avant toute utilisation de ces variables pluviométriques, de contrôler leur fiabilité par l'emploi d'outils statistiques et graphiques, afin de réduire les erreurs qui pourraient les affecter.

Le traitement des données pour notre étude a été fait sur les (44) stations grâce au logiciel Hydrolab, (Laborde et Mouhous, 1998), en utilisant la méthode des cumuls des résidus de régressions (ex : **Figure I.11** et **Tableau I.2 (a), (b)**) permet de détecter les anomalies accidentelles et systématiques (Laborde, 2000).

Vu la difficulté de revenir aux originaux des observations, la correction des anomalies est souvent très délicate à réaliser. Dans cette étude, les années incriminées étaient considérées comme non observées ; pour les cas peu douteux, nous avons choisi de maintenir les données observées sans faire de corrections.

b- Comblement des lacunes

Les stations retenues pour l'étude de la série récente présentent, à l'exception de Reboa et Medina, des lacunes d'observation de un à plusieurs mois, qui sont dues, soit à l'absence de l'observateur, soit à une défaillance du pluviomètre.

La restitution de ces données manquantes a été établie à l'aide d'une analyse en composantes principales (A.C.P.) des valeurs de pluies mensuelles observées pour constituer les vecteurs régionaux (Laborde., 2000). Le traitement des données a été réalisé grâce au logiciel Hydrolab (Laborde et Mouhous, 1998).

Les lacunes d'observations ont été comblées mois par mois, toutefois pour les séries qui présentent des lacunes sur 6 mois ou plus pour une année donnée, on a estimé parallèlement, les totaux annuels afin de les confronter aux totaux mensuels estimés séparément, ce qui permet d'éviter une incohérence des résultats. Afin de rendre homogène la somme des valeurs mensuelle estimées (p') avec l'estimation globale faite à l'échelle de l'année (p), on a multiplié ces valeurs par le rapport (p/p').

c- Les variations spatiales et temporelles des précipitations annuelles

Le graphique de la **Figure I.11** montre une concentration des pluies sur la zone montagneuse située dans la partie nord du bassin où la pluviométrie peut atteindre les 400 mm à Medjana. Elle atteint les 470 mm à Segouene située toujours au nord, mais à l'extérieur du bassin). Au

niveau du piémont et de la plaine, on assiste à une faiblesse des précipitations (seulement 96 mm a été enregistrées à Bel Aroug, 191 mm à Ain El Hadjel et 173 mm à Ain Khhermane).

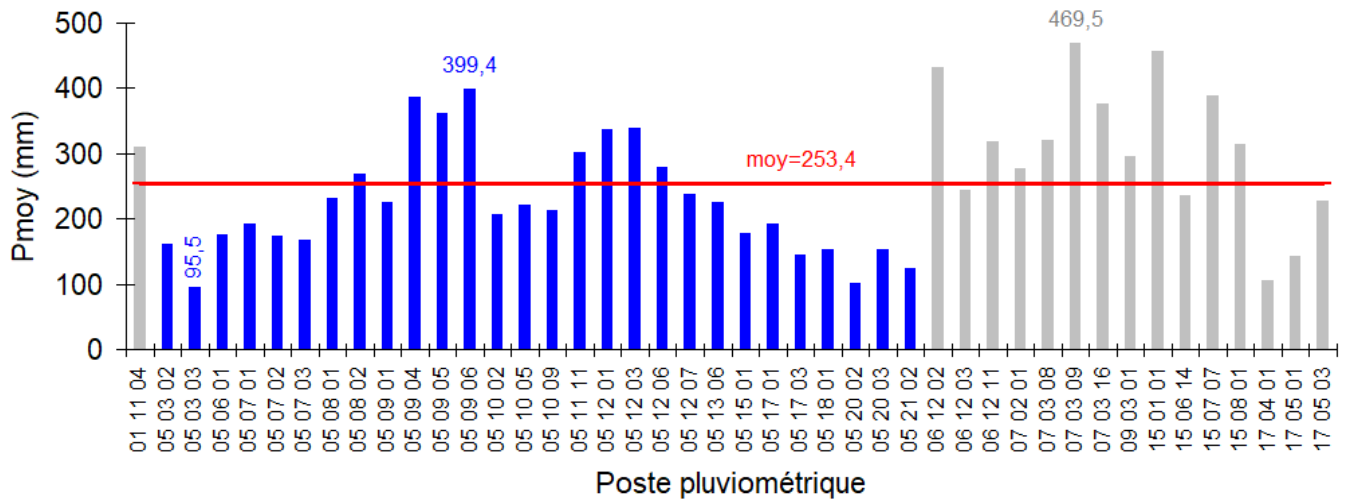


Figure I.11 : Précipitations moyennes interannuelles observées dans les 44 postes pluviométriques.

Pour mieux saisir et préciser la variation pluviométrique annuelle, on s’est basé sur le coefficient de variation, paramètre très efficace pour la mesure du degré de dispersion relative des valeurs particulières autour de la moyenne globale. Nous avons établi également les graphiques ci-dessous (**Figure 1.12**).

Les valeurs du coefficient de variation annuelle de (44) stations retenues pour l’étude, oscillent entre 0,16 et 0,82, avec une distribution spatiale qui variée du nord au sud, donc en fonction du domaine « morpho-climatique » (**Figure 1.12**).

D’une manière générale en peut procéder à un regroupement de stations suivant leur coefficient de variation : Le premier groupe de coefficient relativement faible, il s’agit des stations en zone montagneuse (B. Arreridj 0.16, Ced Fagues 0.25, Bordj Ghdir 0.26 et Cherfa El Ain 0.26) ; Le deuxième groupe de station a un coefficient de variation fort, ceci est lié à la faible pluviosité de la partie sud du bassin (BordjEl l’Agha 0.82, Ain Rich 0.54 et Bel Aroug 0.46).

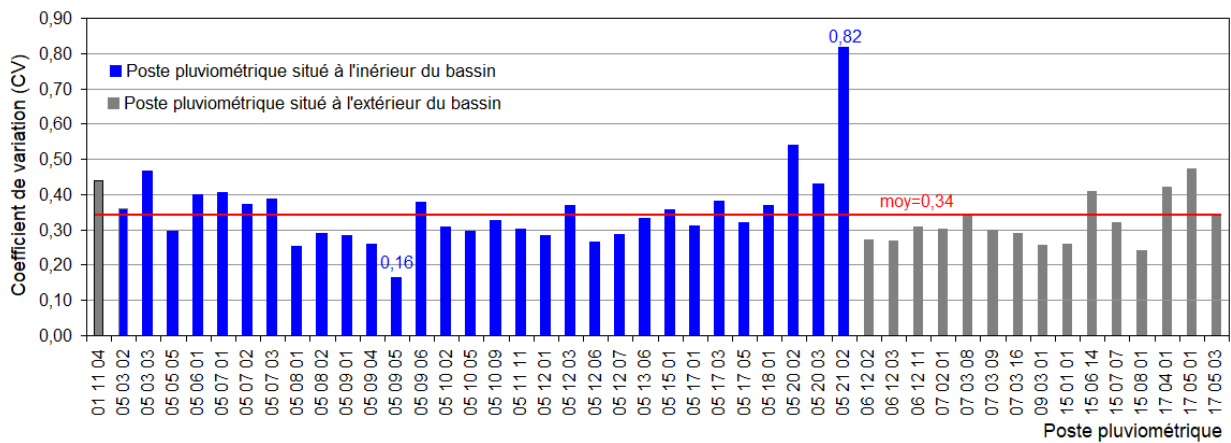


Figure I.12 : Coefficient de variation interannuelle (1975 -2017)

Afin de caractériser la pluviosité propre à chaque année, il convient de tenir compte de " l'écart à la moyenne " correspondant à l'excédent ou au déficit de précipitations de l'année considérée, rapporté à la moyenne de 42 ans ; Nous avons relevé toutes les années pluviométriques extrêmes humides et sèches (Tableau I.2 (a), (b)).

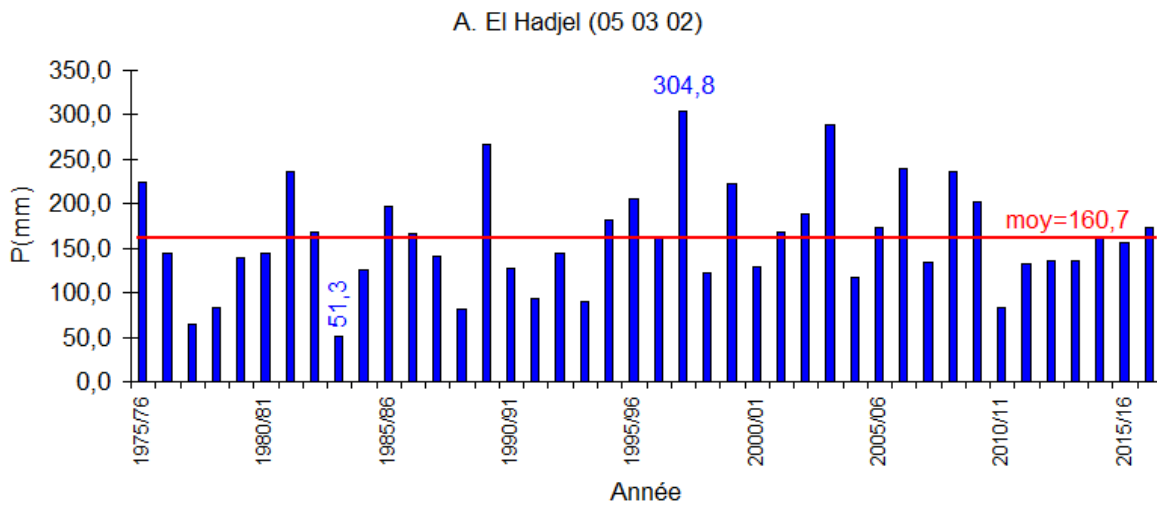


Figure I.13 (a) : Evolution interannuelles des précipitations (1975-2017)

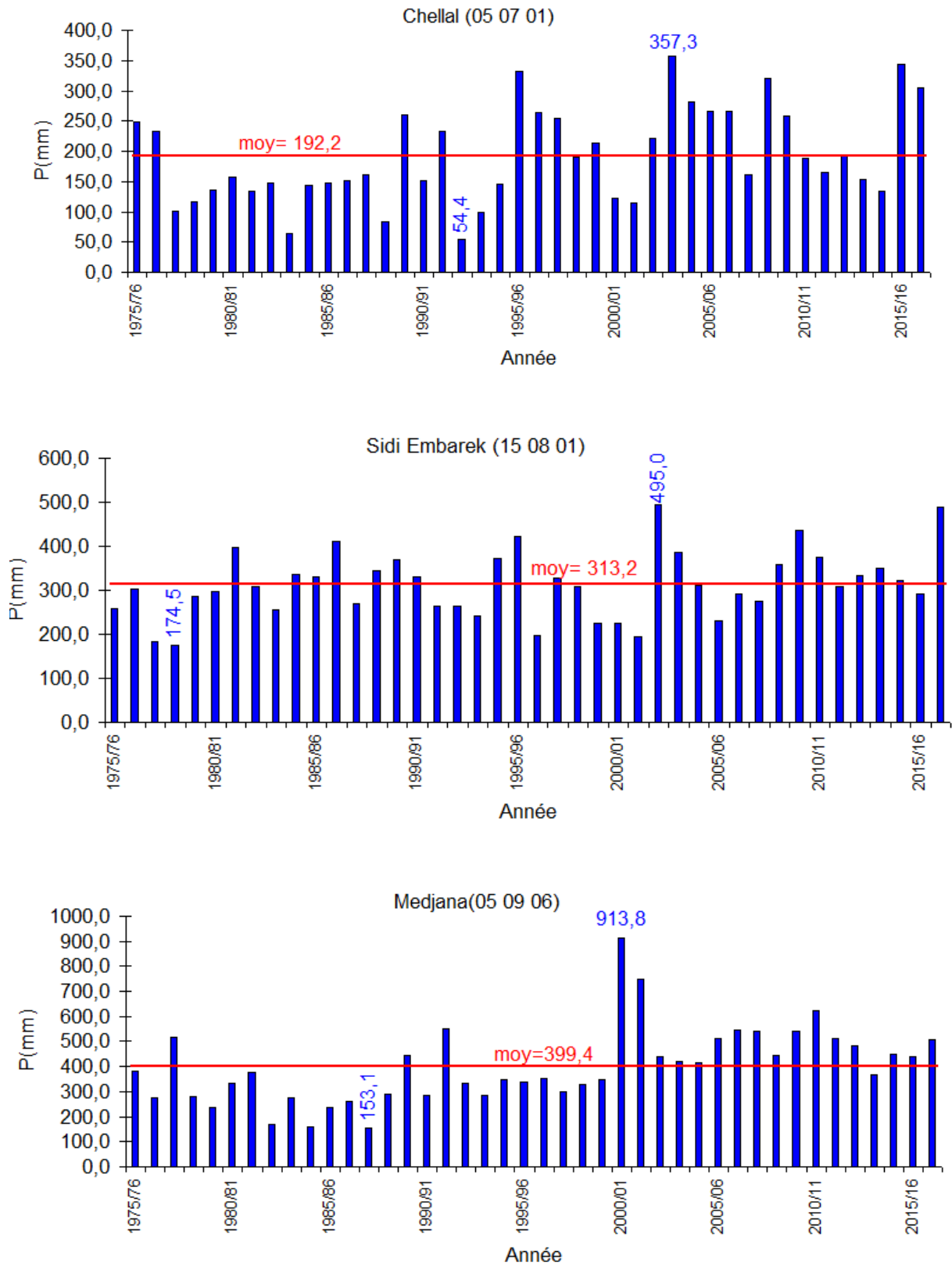


Figure I.13 (b) : Evolution interannuelles des précipitations (1975-2017)

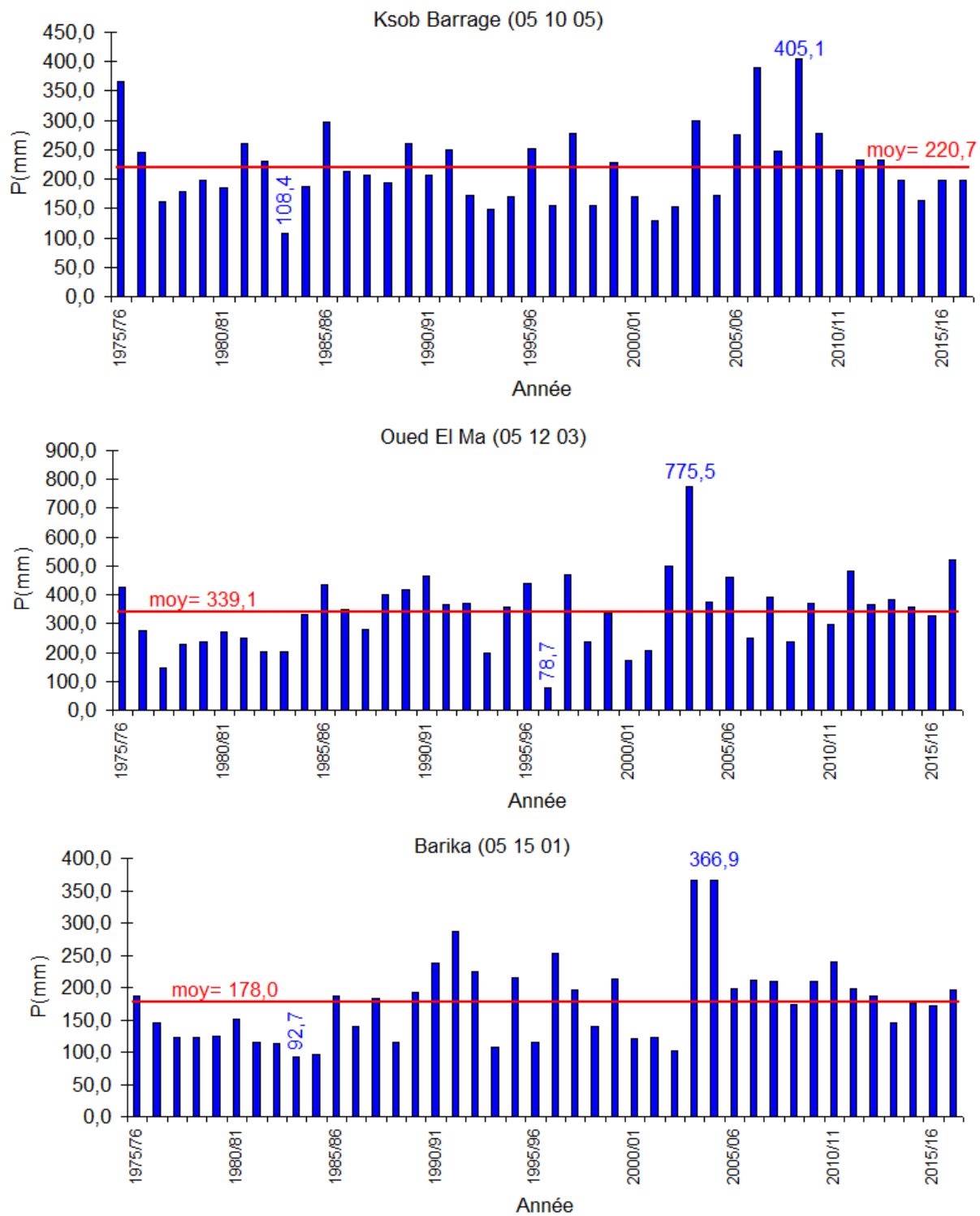


Figure I.13 (c): Evolution interannuelles des précipitations (1975-2017)

A titre d'exemple, l'année la plus pluvieuse de la série est 2000/2001 à Medjana et 2003/2004 à Oued El Ma avec un écart à la moyenne de 129 % et 2008/2009 à la station nommée Ksob Barrage avec un écart à la moyenne de 84 %.

Par contre, l'année 1987/1988 est l'année la plus sèche à Medjana, son déficit pluviométrique par rapport à la moyenne est de -62% ; A Oued El Ma et a fut l'année 1996/1997 avec un déficit pluviométrique de -77% et -51% à Ksob Barrage pendant l'année 1983/1984.

Tableau I.2 (a) : Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1975-2017)

Station	n°	Code	Moyenne annuelle (Pm)	Année sèche extrême	$Pi_{Sèche}$	Ecart à la moyenne $e_{i_{Sèche}} = \frac{Pi_{Sèche} - Pm}{Pm} \cdot 100$	Année humide extrême	Pi_{Humide}	Ecart à la moyenne $e_{i_{Sèche}} = \frac{Pi_{Sèche} - Pm}{Pm} \cdot 100$	Ecart-type (σ)	Coef. de variation $CV = \frac{\sigma}{Pm}$
AIN BOUCIF	1	01 11 04	309,5	1989/1990	36,9	-88,1	1995/1996	557,1	80	136,0	0,44
A. EL HADJEL	2	05 03 02	160,7	1983/1984	51,3	-68,1	1997/1998	304,8	90	57,9	0,36
BEL AROUG	3	05 03 03	95,5	1983/1984	22,7	-76,2	2003/2004	207,9	118	44,3	0,46
SIDI AMEUR	4	05 06 01	174,7	1977/1978	57,4	-67,1	2003/2004	450,3	158	69,2	0,40
CHELLAL	5	05 07 01	192,2	1992/1993	54,4	-71,7	2003/2004	357,3	86	77,3	0,40
A. KHERMANE	6	05 07 02	172,9	1998/1999	60,0	-65,3	2003/2004	327,6	89	63,9	0,37
ROCADE SUD	7	05 07 03	168,2	1983/1984	57,4	-65,9	2003/2004	337,9	101	64,7	0,38
CED FAGUES	8	05 08 01	232,2	1989/1990	122,3	-47,3	2003/2004	363,3	56	57,9	0,25
EL HAOURANE	9	05 08 02	267,8	1983/1984	124,6	-53,5	2003/2004	470,6	76	77,0	0,29
MEDJEZ	10	05 09 01	224,8	1983/1984	129,3	-42,5	2003/2004	366,2	63	63,3	0,28
BORDJ GHDIR	11	05 09 04	386,6	1998/1999	208,4	-46,1	1975/1976	570,9	48	99,4	0,26
B ARRERIDJ	12	05 09 05	361,0	1994/1995	265,0	-26,6	1982/1983	588,0	63	58,8	0,16
MEDJANA	13	05 09 06	399,4	1987/1988	153,1	-61,7	2000/2001	913,8	129	150,3	0,38
MSILA SAR	14	05 10 02	205,9	1983/1984	103,0	-50,0	2003/2004	377,0	83	63,1	0,31
KSOB BARGE	15	05 10 05	220,7	1983/1984	108,4	-50,9	2008/2009	405,1	84	64,7	0,29
TARMOUNT	16	05 10 09	213,8	1983/1984	98,1	-54,1	1989/1990	370,1	73	69,3	0,32
SIDI OUADAH	17	05 11 11	302,1	1998/1999	133,7	-55,7	2005/2006	528,3	75	89,9	0,30
MEROUANA	18	05 12 01	337,1	1995/1996	147,5	-56,3	2003/2004	582,6	73	94,1	0,28
OUED EL MA	19	05 12 03	339,1	1996/1997	78,7	-76,8	2003/2004	775,5	129	123,9	0,37
CHERFA EL AIN	20	05 12 06	278,0	1977/1978	126,0	-54,7	2003/2004	468,6	69	72,9	0,26
HAOUARA DJ.	21	05 12 07	237,2	1996/1997	103,8	-56,2	2003/2004	408,0	72	67,6	0,29
NGAOUS	22	05 13 06	224,2	1977/1978	16,6	-92,6	2003/2004	408,0	82	73,9	0,33

Tableau I.2 (b) : Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1975-2017)

Station	n°	Code	Moyenne annuelle (Pm)	Année sèche extrême	$Pi_{Sèche}$	Ecart à la moyenne $e_{i_{Sèche}} = \frac{Pi_{Sèche} - Pm}{Pm} \cdot 100$	Année humide extrême	Pi_{Humide}	Ecart à la moyenne $e_{i_{Humide}} = \frac{Pi_{Sèche} - Pm}{Pm} \cdot 100$	Ecart-type (σ)	Coef. de variation $CV = \frac{\sigma}{Pm}$
BARIKA	23	05 15 01	178,0	1983/1984	92,7	-47,9	2003/2004	366,9	106	63,2	0,36
M.FERRERO	24	05 17 01	191,7	1977/1978	57,8	-69,8	2009/2010	315,8	65	59,2	0,31
SLIM	25	05 17 03	143,6	1983/1984	47,2	-67,1	1975/1976	267,3	86	54,3	0,38
BANIOU	26	05 18 01	153,8	1983/1984	53,1	-65,5	2003/2004	334,1	117	56,5	0,37
AIN RICH	27	05 20 02	101,4	1983/1984	4,0	-96,1	2010/2011	227,7	125	54,3	0,54
AIN EL MELH	28	05 20 03	153,9	1993/1994	13,5	-91,2	2016/2017	284,8	85	65,6	0,43
BORDJ L AGHA	29	05 21 02	123,4	1984/1985	3,0	-97,6	1994/1995	333,7	170	100,7	0,82
OUED CHAABA	30	06 12 02	430,9	1993/1994	205,0	-52,4	2003/2004	681,1	58	117,8	0,27
AIN TOUTA	31	06 12 03	243,0	1992/1993	100,0	-58,9	2003/2004	402,2	66	65,5	0,27
OUED CHELIH	32	06 12 11	318,9	1998/1999	93,3	-70,7	1985/1986	482,2	51	98,5	0,31
AIN DJASSER	33	07 02 01	277,5	1977/1978	133,6	-51,9	2003/2004	481,2	73	83,6	0,30
HAMLA	34	07 03 08	319,9	1997/1998	84,6	-73,6	1995/1996	577,5	81	107,9	0,34
SEGUENE	35	07 03 09	469,5	2001/2002	195,6	-58,3	1975/1976	785,0	67	140,2	0,30
BATNA FERME	36	07 03 16	376,2	1993/1994	185,8	-50,6	2003/2004	603,8	61	109,4	0,29
DJOUAB	37	09 03 01	295,1	1991/1992	138,1	-53,2	2002/2003	528,6	79	75,6	0,26
S, EL GHOZLANE	38	15 01 01	457,0	1984/1985	255,6	-44,1	2002/2003	840,1	84	119,1	0,26
TIXTER	39	15 06 14	235,2	2001/2002	77,5	-67,0	1991/1992	539,5	129	96,0	0,41
BIR KASDALI	40	15 07 07	389,3	1987/1988	157,8	-59,5	2002/2003	732,5	88	125,0	0,32
SIDI EMBAREK	41	15 08 01	313,2	1978/1979	174,5	-44,3	2002/2003	495,0	58	75,0	0,24
AIN MOUILLAH	42	17 04 01	104,4	1998/1999	8,7	-91,7	2008/2009	268,2	157	44,0	0,42
MEDJEDEL	43	17 05 01	141,6	1984/1985	14,4	-89,8	1989/1990	317,2	124	66,8	0,47
DAR CHIOUKH	44	17 05 03	228,1	1978/1979	72,7	-68,1	2016/2017	447,8	96	77,9	0,34

d. Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers

Sur le plan spatial, les hauteurs moyennes mensuelles de pluie dans les postes pluviométriques du bassin d'étude (**Tableau I.2 (a) et (b)**), qui suivent pratiquement une coupe Nord-Sud, montrent clairement la variabilité spatiale de ces précipitations, elle est relativement plus accentuée dans le Sud du bassin ; Ceci reste très nuancé selon le mois et la réalité géographique des différents secteurs du bassin.

On relève une amplitude importante des valeurs pluviométriques, entre les mois de l'année pluviométrique, ceci est mis en évidence par le coefficient de variation. En effet, les coefficients les plus élevés sont ceux des stations situées dans la partie sud du bassin, avec un maximum à Ain Rich (0,59) ; Ces coefficients élevés, s'expliquent par l'indigence pluviométrique dans ce secteur du bassin d'une part, et le caractère orageux des précipitations (averse) d'autre part.

La valeur minimale de ce coefficient est observée dans toutes les stations situées au nord du bassin ; Il atteint 0,30 à Ain El Hadjel, c'est le coefficient de variation le plus faible de toutes les stations (**Tableau I.3 (a) et (b)**).

L'évolution pluviométrique mensuelle pendant une année moyenne, relative à la période 1975/2017, qui est représenté par les graphiques ci-dessous (**Figure I.13 (a),(b),(c)**) Traduisent clairement les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle, et permet de distinguer deux grandes périodes :

- Une période sèche où les précipitations sont inférieures à la moyenne mensuelle de l'année. Or il s'avère d'après les graphiques que les mois dits secs ne sont pas consécutifs dans plusieurs stations ; Cependant les mois de juin, juillet, août, sont secs dans toutes les stations, ils représentent la saison sèche et chaude de l'été, et le minimum est atteint en juillet ; Le mois de février est aussi sec dans plusieurs stations.
- Une période humide où les précipitations sont supérieures à la moyenne mensuelle de l'année, elle débute en septembre et s'achève en mai, avec un premier maximum en septembre-octobre-novembre et un deuxième en mars-avril-mai dans la majorité des stations du bassin.

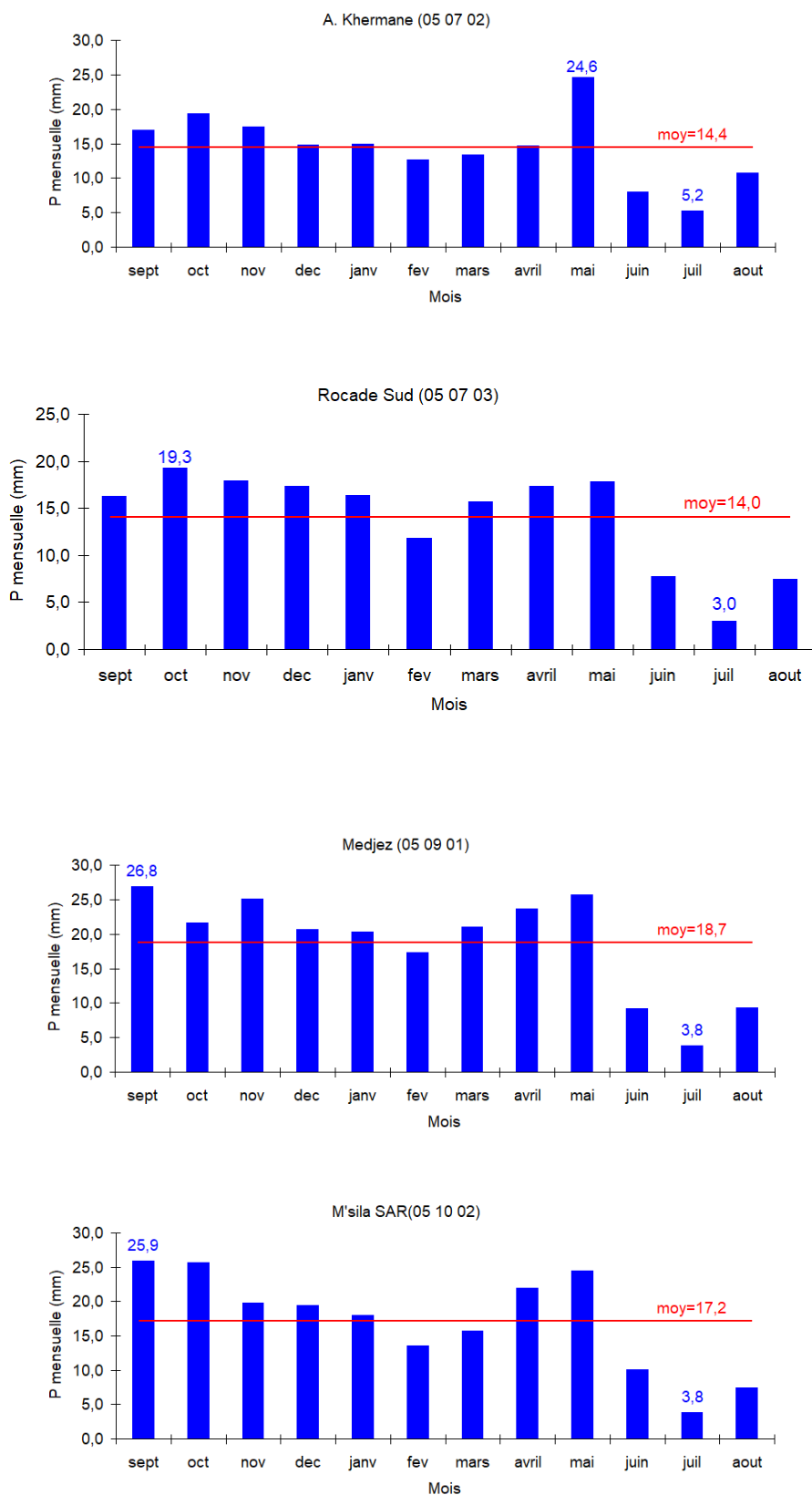


Figure I.14 (a) : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017)

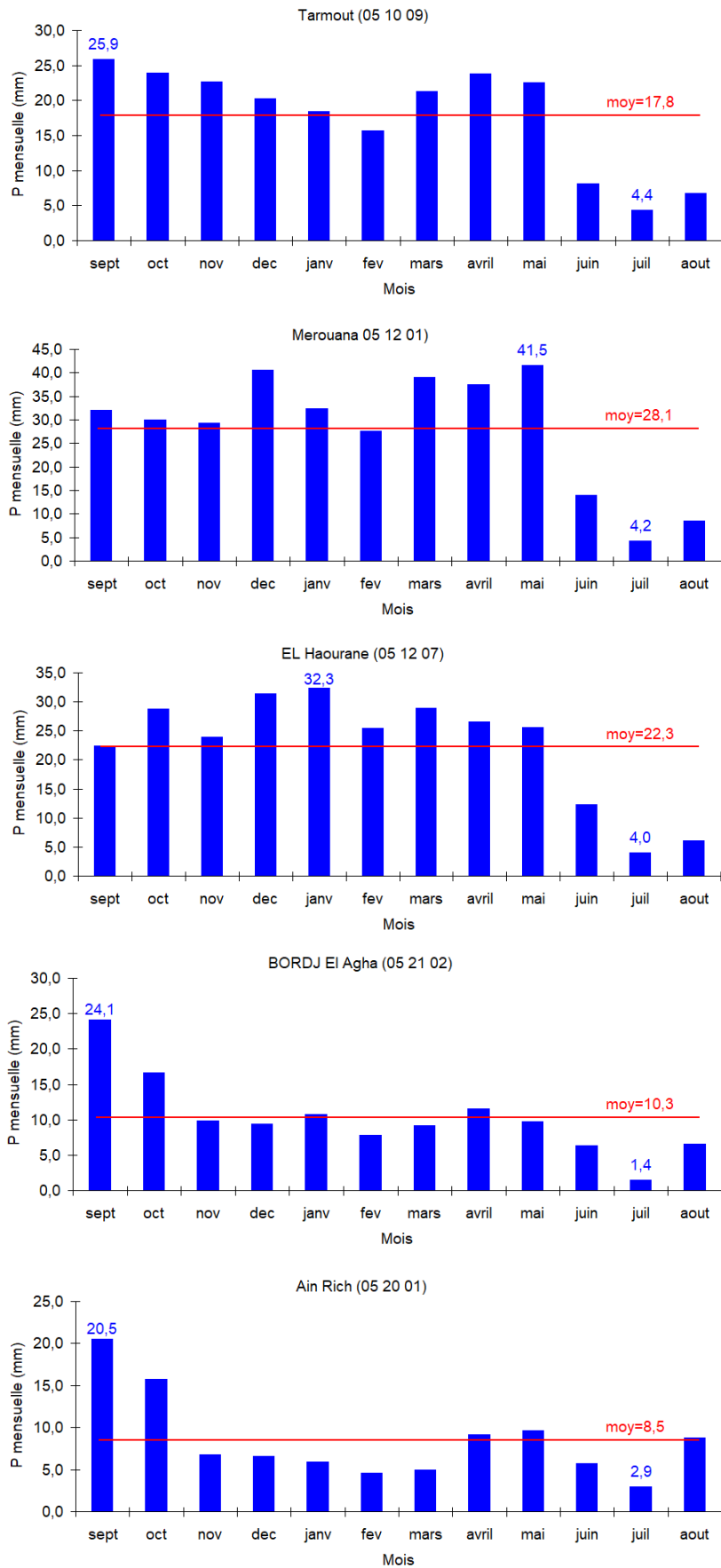


Figure I.14 (b) : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017)

Tableau I.3 (a) : Caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles aux postes pluviométriques retenus pour l'étude (1975-2017)

Station	n°	Code	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	moy	total	σ	cv
A. EL HADJEL	2	50302	10,9	15,6	15,0	13,8	17,3	12,2	16,8	14,1	19,1	13,6	5,6	6,8	13,4	160,7	4,0	0,30
BEL AROUG	3	50303	4,5	7,2	9,5	6,0	13,8	6,8	17,5	11,5	5,7	3,7	2,9	6,5	8,0	95,5	4,4	0,55
SIDI AMEUR	4	50601	22,3	16,2	21,6	22,1	18,4	12,8	12,4	17,0	16,5	4,5	2,2	8,5	14,6	174,7	6,7	0,46
CHELLAL	5	50701	18,2	23,4	19,9	14,0	19,4	11,4	19,4	18,2	22,8	12,6	4,2	8,6	16,0	192,2	5,9	0,37
A. KHERMANE	6	50702	17,0	19,3	17,4	14,8	14,9	12,7	13,4	14,7	24,6	8,0	5,2	10,8	14,4	172,9	5,1	0,35
ROCADE SUD	7	50703	16,3	19,3	17,9	17,4	16,4	11,8	15,7	17,4	17,9	7,8	3,0	7,4	14,0	168,2	5,3	0,37
EL HAOURANE	9	50802	22,5	28,8	23,9	31,3	32,3	25,5	28,9	26,5	25,6	12,3	4,0	6,1	22,3	267,8	9,6	0,43
MEDJEZ	10	50901	26,8	21,7	25,2	20,7	20,3	17,4	21,1	23,7	25,7	9,2	3,8	9,3	18,7	224,8	7,4	0,40
BORDJ GHDIR	11	50904	34,0	35,7	39,5	43,2	41,6	30,8	38,9	46,4	41,4	19,1	6,8	9,2	32,2	386,6	13,3	0,41
B ARRERIDJ DEMRH	12	50905	31,8	28,6	35,9	39,3	37,3	28,7	32,1	45,3	41,3	21,0	6,8	12,9	30,1	361,0	11,5	0,38
MEDJANA	13	50906	42,8	26,9	39,9	52,0	49,0	39,9	38,0	39,8	39,0	11,2	6,4	14,5	33,3	399,4	15,0	0,45
MSILA SAR	14	51002	25,9	25,6	19,8	19,5	17,9	13,5	15,7	21,9	24,5	10,1	3,8	7,5	17,2	205,9	7,2	0,42
KSOB BARGE	15	51005	13,1	25,3	26,2	22,0	16,9	18,5	22,0	27,2	27,6	11,5	4,6	5,9	18,4	220,7	8,1	0,44
TARMOUNT	16	51009	25,9	23,9	22,6	20,3	18,5	15,7	21,3	23,8	22,6	8,1	4,4	6,8	17,8	213,8	7,4	0,42
SIDI OUADAH	17	51111	29,4	32,3	30,3	33,6	32,3	27,5	30,2	29,3	34,8	11,9	2,1	8,5	25,2	302,1	11,0	0,44
MEROUANA	18	51201	32,1	30,0	29,4	40,6	32,4	27,7	39,0	37,5	41,5	14,0	4,2	8,6	28,1	337,1	12,6	0,45
OUED EL MA	19	51203	28,2	27,6	31,9	42,0	33,4	26,4	36,6	41,9	42,4	15,3	2,0	11,4	28,3	339,1	12,9	0,46
CHERFA EL AIN	20	51206	25,3	28,2	26,9	31,0	30,1	23,7	28,0	31,1	27,6	12,6	4,4	9,2	23,2	278,0	9,1	0,39
HAOUARA DJ.	21	51207	20,2	20,1	25,1	32,0	28,7	22,0	21,9	29,5	21,1	8,3	2,9	5,4	19,8	237,2	9,5	0,48
NGAOUS	22	51306	27,5	28,5	21,8	21,3	21,2	15,8	22,6	26,7	21,3	7,1	2,6	7,9	18,7	224,2	8,5	0,46
BARIKA	23	51501	20,9	21,3	16,6	18,6	31,9	11,0	15,2	16,2	12,6	8,2	1,0	4,4	14,8	178,0	8,3	0,56

Tableau I.3 (b) Caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles aux postes pluviométriques retenus pour l'étude (1975-2017)

Station	n°	Code	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	moy	total	σ	cv
MOULIN FERRERO	24	51701	35,2	24,8	15,7	16,7	17,2	15,6	11,4	20,8	20,5	4,2	5,4	4,2	16,0	191,7	9,1	0,57
SLIM	25	51703	19,0	15,8	11,6	10,5	15,5	8,6	13,9	15,0	17,4	7,8	3,2	5,2	12,0	143,6	5,0	0,42
BANIOU	26	51801	17,3	18,8	16,3	13,3	14,6	9,5	13,2	16,2	16,4	8,6	3,8	5,9	12,8	153,8	4,8	0,37
AIN RICH	27	52002	20,5	15,8	6,8	6,6	6,0	4,6	5,0	9,1	9,7	5,8	2,9	8,7	8,5	101,4	5,0	0,59
AIN EL MELH	28	52003	30,1	17,3	12,7	9,6	13,7	9,3	7,6	13,6	17,2	11,8	2,5	8,4	12,8	153,9	6,8	0,53
BORDJ L AGHA	29	52102	24,1	16,7	9,9	9,4	10,8	7,8	9,1	11,6	9,7	6,4	1,4	6,6	10,3	123,4	5,6	0,55
AIN TOUTA	31	61203	23,4	27,0	31,5	25,2	25,2	14,4	19,8	18,0	26,1	19,8	8,1	4,5	20,3	243,0	8,0	0,39
OUED CHELIH	32	61211	36,5	26,3	34,0	36,9	29,6	28,9	33,4	32,9	26,9	13,3	4,7	15,5	26,6	318,9	10,2	0,38
AIN DJASSER	33	70201	31,1	24,7	23,2	28,0	25,6	21,5	25,1	31,8	34,9	14,2	4,7	12,7	23,1	277,5	8,8	0,38
HAMLA	34	70308	30,5	25,1	36,1	32,1	36,6	34,4	33,5	33,7	29,7	16,0	2,3	9,9	26,7	319,9	11,2	0,42
SEGUENE	35	70309	44,2	37,0	50,7	52,1	47,4	39,5	57,6	47,6	44,8	24,4	9,0	15,3	39,1	469,5	15,2	0,39
BATNA FERME EXP.	36	70316	43,8	29,6	36,9	36,0	35,2	29,0	40,4	38,2	39,6	23,3	8,2	16,0	31,3	376,2	10,7	0,34
DJOUAB	37	90301	16,7	26,5	32,3	44,5	38,1	28,9	31,3	32,4	24,8	10,7	3,4	5,6	24,6	295,1	12,9	0,52
S, EL GHOZLANE	38	150101	30,9	35,2	50,0	64,2	61,0	51,1	44,3	53,7	37,2	9,5	7,6	12,2	38,1	457,0	19,7	0,52
TIXTER	39	150614	22,7	22,5	21,2	23,1	18,7	17,1	24,7	30,2	29,4	11,1	5,3	9,1	19,6	235,2	7,8	0,40
BIR KASDALI	40	150707	32,2	24,8	37,1	42,8	40,5	34,9	47,0	45,1	42,7	20,8	9,2	12,2	32,4	389,3	12,9	0,40
SIDI EMBAREK	41	150801	28,6	25,6	31,2	34,5	37,0	25,8	31,7	39,0	33,2	16,1	3,6	7,0	26,1	313,2	11,4	0,44
AIN MOUILLAH	42	170401	14,1	9,9	5,6	6,7	11,4	9,5	13,1	12,2	8,0	4,2	6,4	3,5	8,7	104,4	3,5	0,41
MEDJEDEL	43	170501	14,7	13,5	12,8	10,9	15,4	11,7	11,0	16,9	18,4	8,2	3,9	4,2	11,8	141,6	4,6	0,39
DAR CHIOUKH	44	170503	24,3	18,9	17,5	20,6	25,4	14,7	22,5	26,4	22,6	21,4	2,4	11,6	19,0	228,1	6,8	0,36

La répartition saisonnière des pluies, en pourcentage, dans les stations du bassin (**Tableau I.4**) permet de distinguer un régime pluviométrique continental. Ce régime est caractérisé par une lame d'eau tombée en automne équivalent à-peu-près à la quantité de pluie printanière (environ 30,5% de moyenne annuelle), et une proportion de pluie hivernale relativement moindre, soit 28% des précipitations annuelles, alors que la saison d'été est caractérisée par une faiblesse quantitative des précipitations, soit un pourcentage de 11% de la moyenne annuelle.

Tableau I.4 : Répartition saisonnière des pluies dans les stations retenues dans l'étude.

Station	n°	Code	Automne	Hiver	Printemps	Eté	total annuel
A. EL HADJEL	2	50302	25,8	27,0	31,1	16,2	160,7
BEL AROUG	3	50303	22,2	27,8	36,3	13,7	95,5
SIDI AMEUR	4	50601	34,4	30,6	26,3	8,7	174,7
CHELLAL	5	50701	32,0	23,3	31,4	13,2	192,2
A. KHERMANE	6	50702	31,0	24,5	30,5	13,9	172,9
ROCADE SUD	7	50703	31,8	27,1	30,3	10,8	168,2
EL HAOURANE	9	50802	28,1	33,3	30,3	8,4	267,8
MEDJEZ	10	50901	32,8	26,0	31,4	9,9	224,8
BORDJ GHDIR	11	50904	28,2	29,9	32,8	9,1	386,6
B ARRERIDJ DEMRH	12	50905	26,7	29,2	32,9	11,3	361,0
MEDJANA	13	50906	27,4	35,3	29,3	8,0	399,4
MSILA SAR	14	51002	34,7	24,8	30,2	10,4	205,9
KSOB BARGE	15	51005	29,2	26,0	34,8	10,0	220,7
TARMOUNT	16	51009	33,9	25,4	31,7	9,0	213,8
SIDI OUADAH	17	51111	30,5	30,9	31,2	7,5	302,1
MEROUANA	18	51201	27,1	29,9	35,0	8,0	337,1
OUED EL MA	19	51203	25,9	30,0	35,6	8,5	339,1
CHERFA EL AIN	20	51206	28,9	30,5	31,2	9,4	278,0
HAOUARA DJ.	21	51207	27,6	34,8	30,6	7,0	237,2
NGAOUS	22	51306	34,7	26,0	31,5	7,9	224,2
BARIKA	23	51501	33,0	34,6	24,7	7,7	178,0
MOULIN FERRERO	24	51701	39,5	25,8	27,5	7,2	191,7
SLIM	25	51703	32,4	24,1	32,2	11,3	143,6
BANIOU	26	51801	34,0	24,3	29,8	11,9	153,8
AIN RICH	27	52002	42,4	16,9	23,5	17,2	101,4
AIN EL MELH	28	52003	39,1	21,2	24,9	14,8	153,9
BORDJ L AGHA	29	52102	41,0	22,6	24,7	11,6	123,4
AIN TOUTA	31	61203	33,7	26,7	26,3	13,3	243,0
OUED CHELIH	32	61211	30,3	29,9	29,2	10,5	318,9
AIN DJASSER	33	70201	28,5	27,1	33,0	11,4	277,5
HAMLA	34	70308	28,7	32,2	30,3	8,8	319,9
SEGUENE	35	70309	28,1	29,6	31,9	10,4	469,5
BATNA FERME EXP.	36	70316	29,3	26,6	31,4	12,6	376,2
DJOUAB	37	90301	25,6	37,8	30,0	6,7	295,1
S, EL GHOZLANE	38	150101	25,4	38,6	29,6	6,4	457,0
TIXTER	39	150614	28,3	25,1	35,8	10,8	235,2
BIR KASDALI	40	150707	24,2	30,4	34,6	10,8	389,3
SIDI EMBAREK	41	150801	27,2	31,1	33,2	8,5	313,2
AIN MOUILLAH	42	170401	28,3	26,4	31,9	13,5	104,4
MEDJEDEL	43	170501	28,9	26,8	32,7	11,5	141,6
DAR CHIOUKH	44	170503	26,6	26,6	31,3	15,5	228,1
MOYENNE			30,4	28,2	30,8	10,6	

Chapitre II

Analyse cartographique et interprétation

Parallèlement à l'exploitation des données de mesure pluviométrique, la cartographie automatique des isohyètes s'appuie sur le traitement de l'information géo-topographique, facteur influençant notablement la variation spatiale des pluies. (Mebarki A,2003). Cette approche, que nous utilisons dans l'étude des précipitations annuelles moyennes du bassin du Chott Hodna, est exploitable grâce à l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) et des relations statistiques existants entre les précipitations et certaines caractéristiques du relief et de position de la région à cartographier.

Par cette technique, nous voudrions mettre la lumière sur les méthodes d'interpolation spatiale et leur efficacité en matière de représentation cartographique des précipitations, en tenant compte des différentes variables topo-géographiques (position géographique, altitude et distance à la mer) à partir de modèles de régression linéaire multiple.

II-1 Régression multiples et prédiction des précipitations

Une analyse de régression génère une équation pour décrire la relation statistique entre un ou plusieurs prédicteurs (variables explicatives) et la variable de réponse (variable à expliquer), ainsi que pour prévoir de nouvelles observations.

La méthode d'estimation par les moindres carrés est généralement utilisée pour la détermination de l'équation de régression. Celle-ci correspond à l'équation qui minimise la somme des distances quadratiques entre les points de données de l'échantillon et les valeurs prévues par l'équation. Les résultats de la régression indiquent la direction, l'ampleur et la signification statistique de la relation entre un prédicteur et une réponse (Minitab, 2019)

On parle de régression linéaire multiple, lorsque les modèles comportent plusieurs prédicteurs.

II-1-1 principe

On cherche à expliquer une variable y à partir de k variables x . Les variables y et x sont gaussiennes, et les paramètres de cette loi de distribution sont :

- Les moyennes marginales : $\bar{y}, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k$
- Les écarts-types marginaux : $\sigma_y, \sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_k}$
- Les coefficients de corrélation totale.

Il faut évaluer les $(k + 1)$ coefficients de régression a_i , le coefficient de corrélation multiple (R), et les k coefficients de corrélation partielle $r_{y x_i x_1 x_2 \dots x_k}$

On considère que le coefficient de corrélation multiple R est significatif si la variance expliquée est significativement supérieure à la variance résiduelle (la quantité $F = \frac{n-k-1}{k} \cdot \frac{R^2}{1-R^2}$ doit être significativement supérieure à 1).

Les valeurs de F sont données par les tables de Snedecor avec les degrés de liberté $\vartheta_1 = k$ et $\vartheta_2 = n - (k + 1)$. Des abaques donnent directement les valeurs du R aux seuils de 1% et 5 % en fonction du nombre d'observations. Pour les seuils de signification des $r_{y x_i x_1 x_2 \dots x_k}$, on utilise les tables de Soudent avec le nombre de degré de liberté $\vartheta = n - k - 1$.

Deux méthodes sont utilisables pour sélectionner les variables prédicteurs X_i susceptibles d'avoir une influence sur la variable réponse Y : la Méthode progressive (Stepwise Regression) et Méthode régressive (backward elimination), (Louamri, 2013).

II-1-2 Variables à cartographier : la pluie moyenne annuelle

La cartographie de la pluviométrie moyenne interannuelle permet le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant.

Pour cette application sur le bassin du Chott Hodna, l'objectif est d'élaborer une esquisse cartographique des pluies moyennes interannuelles pour une période de 42 ans allant du 1^{er} septembre 1975 et le 31 août 2017. Au total, 44 stations ont été considérées, dont 16 sont situées en dehors de la limite du bassin d'étude. Ces dernières ont été prises en compte afin de ne pas manquer de précision au niveau des zones périphériques (**Tableau 1.4**, 1^{ère} partie). La moyenne interannuelle sur 42 ans varie de 96 mm (station de Bel Aroug située à 693 m d'altitude) à 470 mm (station de Segouene à 1400 m d'altitude en dehors du bassin), avec une moyenne de 253 mm.

II-1-3 Variables explicatives

Pour établir quantitativement l'influence du relief et de la position géographique sur la répartition spatiale des précipitations, différentes variables topo-géographiques (latitude et longitude, altitude et distance à la mer) sont considérées à partir de modèles de régression linéaire multiple.

a- Latitude et longitude

Il est incontestable que les précipitations en Algérie décroissent du littoral vers l'intérieur suivant un fort gradient latitudinal, altéré toutefois par l'effet orographique (Seltzer 1946, Laborde 2004, Mebarki 2005). En termes de variance, la latitude (Y Lambert) explique 43 % de la distribution spatiale des pluies moyennes annuelles à l'échelle du bassin d'étude (Figures II.1 et II.2). L'impact de la longitude est moins net, on trouve qu'elle est peu corrélée avec les pluies annuelles et explique seulement 25% de la variance (Figures II.1 et II.2).

b- Altitude

La relation entre la pluie et l'altitude est connue depuis longtemps. Deux types de données peuvent être utilisés, l'altitude réelle des postes et l'altitude lissée qui traduit au mieux le trajet des flux atmosphériques (Laborde, 2004).

En effet, le calcul de l'altitude lissée, pour chaque nœud du MNT initial (Figure I.9), requiert la construction d'un maillage régulier de 09 nœuds centrés sur la station pluviométrique (Figure II.1). Le Zliss à retenir présente la valeur maximale entre : l'altitude réelle au poste et les 04 cotes obtenues par interpolation linéaire des huit (08) nœuds les plus proches (Inegliz, 2002, in : Guidoum, 2017). Pour notre bassin d'étude, seuls 5% de la variance sont expliquées par l'altitude lissée des stations (Zliss). (Figures II.1 et II.2).

c- Distance à la mer

Les études sur la pluviométrie réalisées en Algérie ont fait ressortir que la distance à la mer est l'un des facteurs primordiaux constituant les lois de la pluviosité pour l'Algérie (Seltzer 1946 ; Gaussen, 1948 ; Chaumont et Paquin, 1971, Mebarki, 2003, in : Louamri, 2013). Les auteurs de ces études ont intégré la distance à la mer comme facteur explicatif dans les régressions multiples pluie-facteurs physio-géographiques.

À l'échelle de la région étudiée, l'éloignement à la mer (la plus courte distance à la mer) explique 41% de la distribution spatiale des pluies moyennes annuelles (Figures II.3 et II.4).

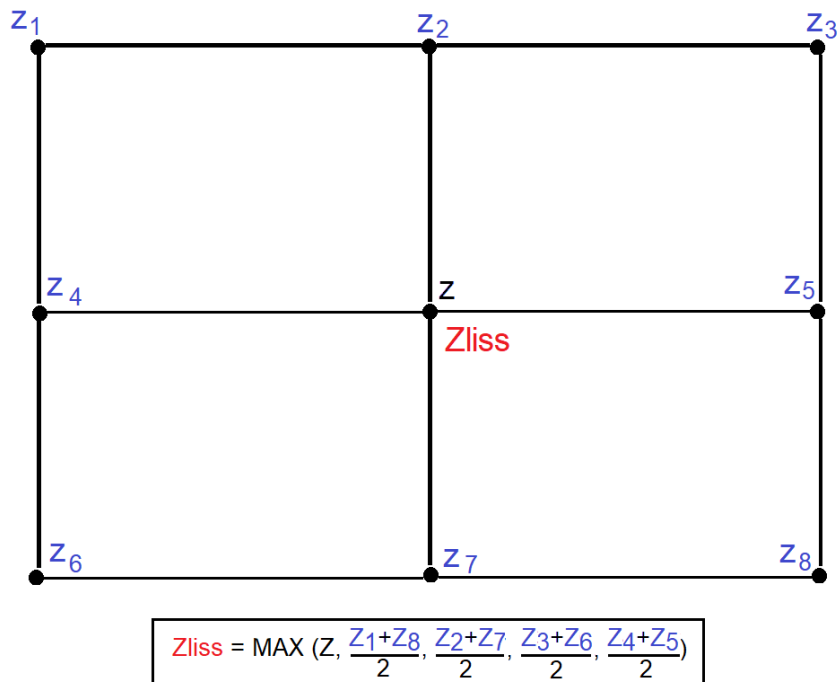


Figure II.1 : Estimation de l'altitude lissée (Zliss)

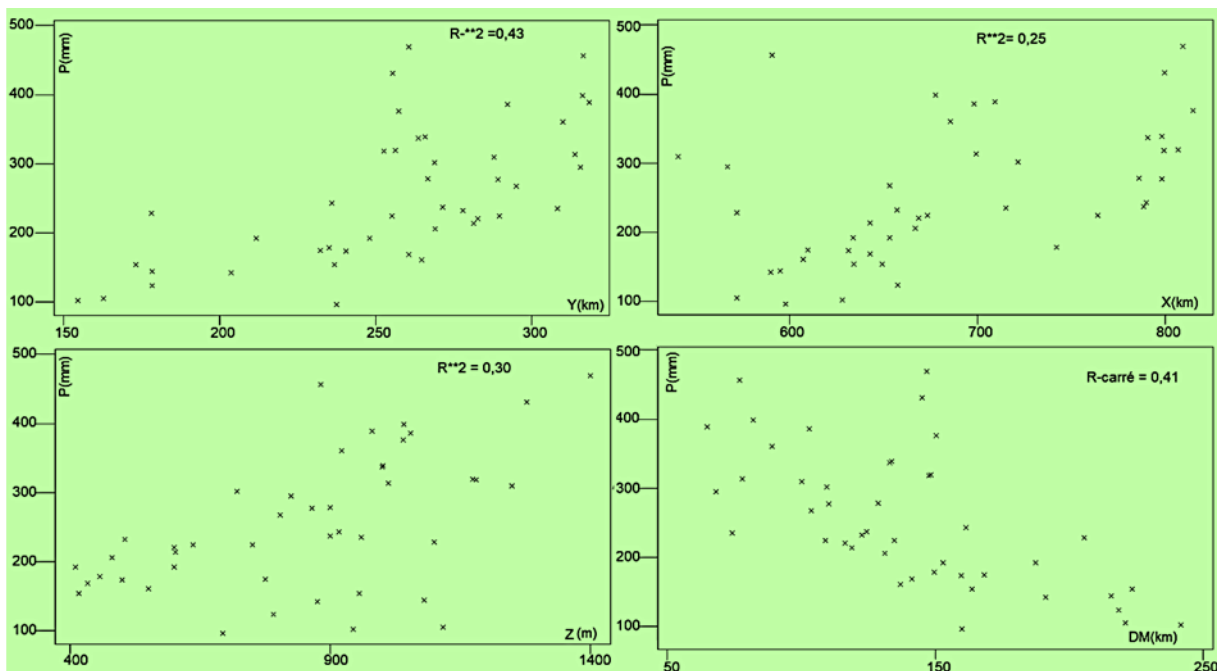


Figure II.2 : Corrélations pluie annuelle, latitude, longitude, altitude et distance à la mer

Toutefois, les paramètres explicatifs sont liés entre eux : une partie de l'effet de la distance à la mer se retrouve dans la longitude et l'influence des altitudes est liée à la distance à la mer et à la longitude. Seule une régression multiple permettra de choisir directement ceux à retenir (Laborde, 2004).

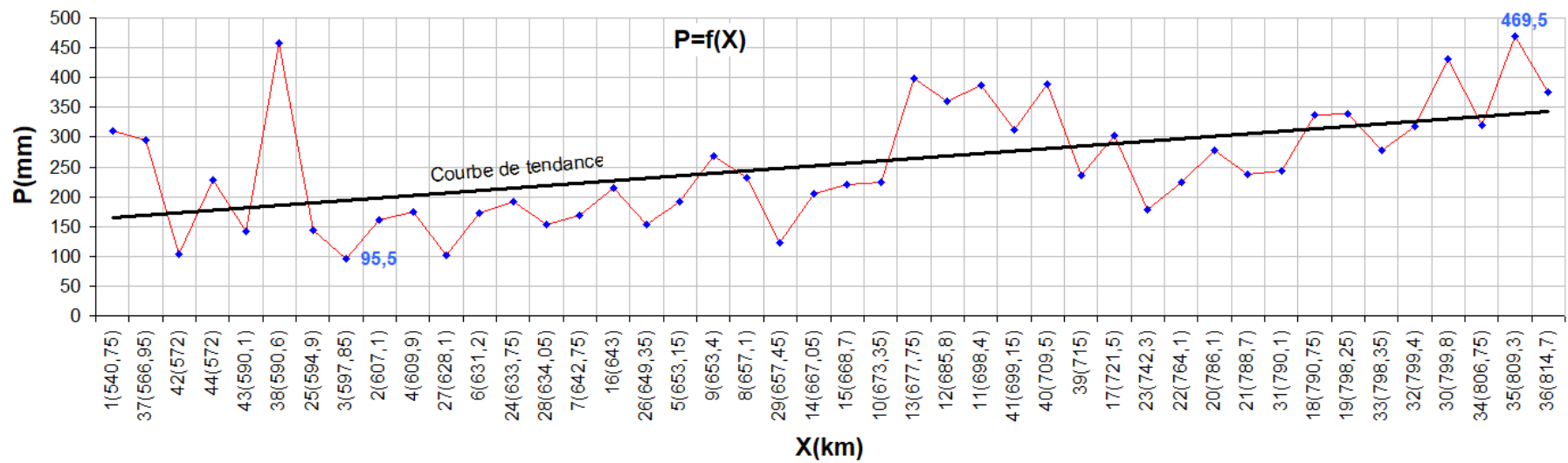
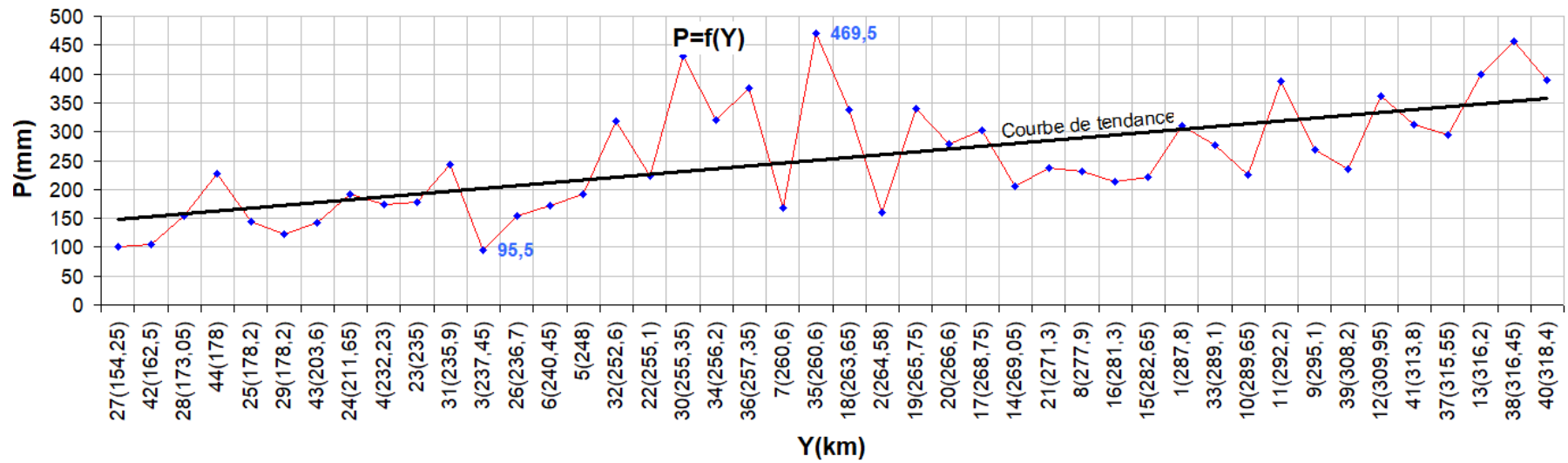


Figure II.3 : Pluie moyenne annuelle en fonction de la latitude et la longitude

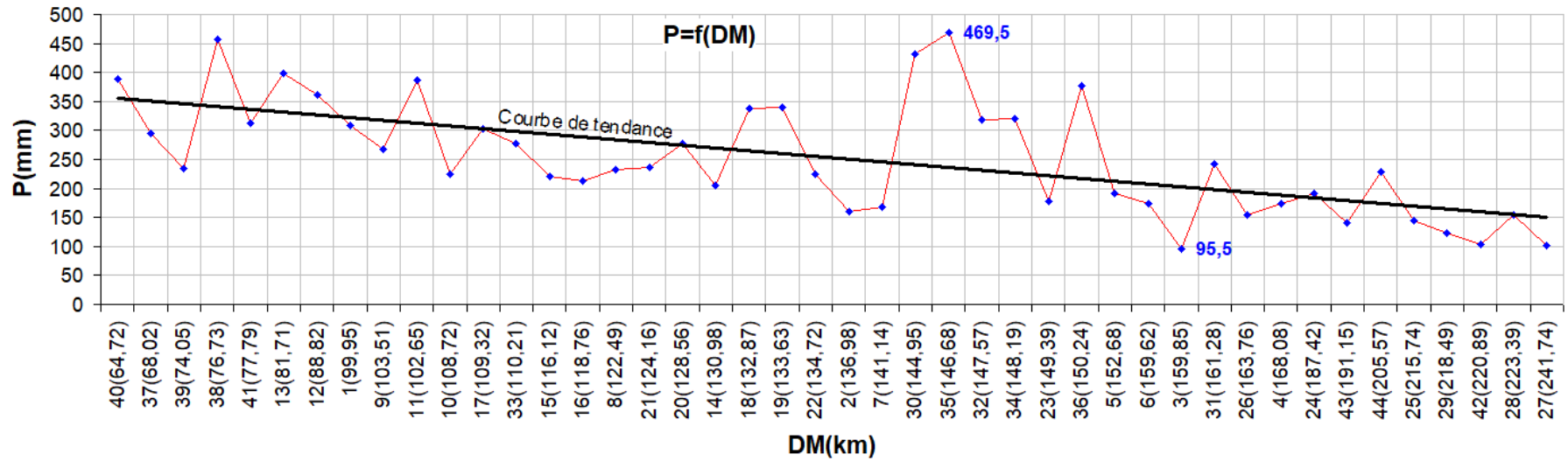
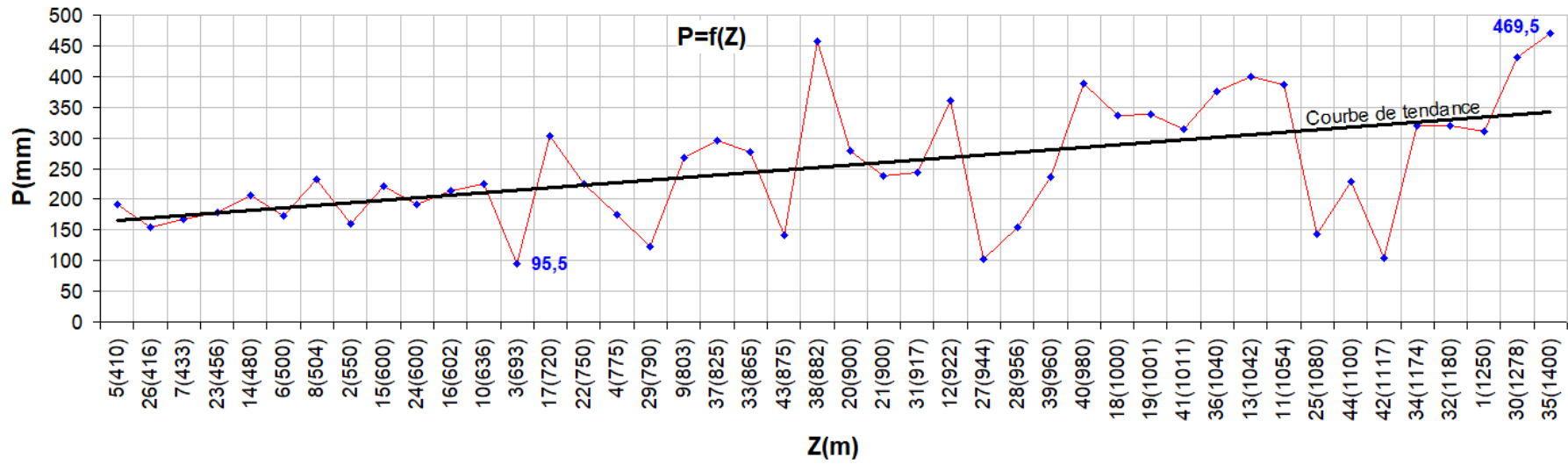


Figure II.4 : Pluie moyenne annuelle en fonction de l'altitude et de la distance à la mer

II-1-4 Corrélation et validation des modèles régressifs

Dans un premier temps, nous avons essayé une régression multiple entre la pluie moyenne (1975/2017) avec le maximum de facteurs qui pouvaient expliquer la répartition spatiale des pluies.

Nous pouvons donc penser que la pluie de la zone d'étude s'explique linéairement en fonction de l'altitude lissée Zliss, de la distance à la mer DM et des coordonnées Lambert X et Y. Les quantités X/Y, Zliss/X, Zliss/Y, X.Zliss/Y, et Y.Zliss/X ont été également considérés lors de la recherche de l'équation de régression.

Au total nous avons donc 09 variables susceptibles d'être explicatives. Les essais de régressions multiples pas à pas (Stepwise Regression) réalisés sous MINITAB 13.31 montrent que certaines variables (quantités) ne sont jamais utilisées, et certaines d'autres apparaissent plusieurs fois comme prédicateurs.

Finalement, nous n'avons retenu que deux relations (**Tableau II.1**) dont la racine carrée des précipitations annuelles (\sqrt{Pa}) se corréle mieux avec les quantités à savoir : $Y, Zliss, Zliss/X, X/Y$ et \sqrt{Dm} .

Tableau II.1 : Résultats de la régression multiple : pluies annuelles - paramètres explicatifs

Equation(1) $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Zliss) + 3,32(Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$										
Variables	Coefficients de régression	Terme constant	Corrélation multiple*					Corrélation partielle		
			Coefficient de corrélation multiple R	Coefficients de corrélation multiple ajusté $r_{ajust} (\alpha = 5\%)$	R^2_{ajust}	F	p-value	r	T	p-value
Y	0,06662	-12,58	0,90	0,89	0,79	41,51	0,000	0,363	2,43	0,015
Zliss	0,011271							0,641	5,22	0,000
Zliss/X	-3,325							-0,327	-2,16	0,030
\sqrt{Dm}	0,4896							0,226	1,79	0,041
Equation(2) $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104(Y) + 0,00606(Zliss) + 1,91(X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$										
Variables	Coefficients de régression	Terme constant	Corrélation multiple*					Corrélation partielle		
			Coefficient de corrélation multiple R	Coefficients de corrélation multiple ajusté $r_{ajust} (\alpha = 5\%)$	R^2_{ajust}	F	p-value	r	T	p-value
Y	0,10446	-31,37	0,90	0,89	0,79	41,46	0,000	0,593	4,60	0,000
Zliss	0,0060558							0,701	6,14	0,000
X/Y	1,9091							0,326	2,15	0,031
\sqrt{Dm}	0,8459							0,340	2,54	0,012

*La significativité globale du modèle est fournie à l'aide d'un test F Fisher-Snedecor et une probabilité associée p-value. Si F est associé à une probabilité d'erreur < 5 %, le modèle est donc globalement significatif.

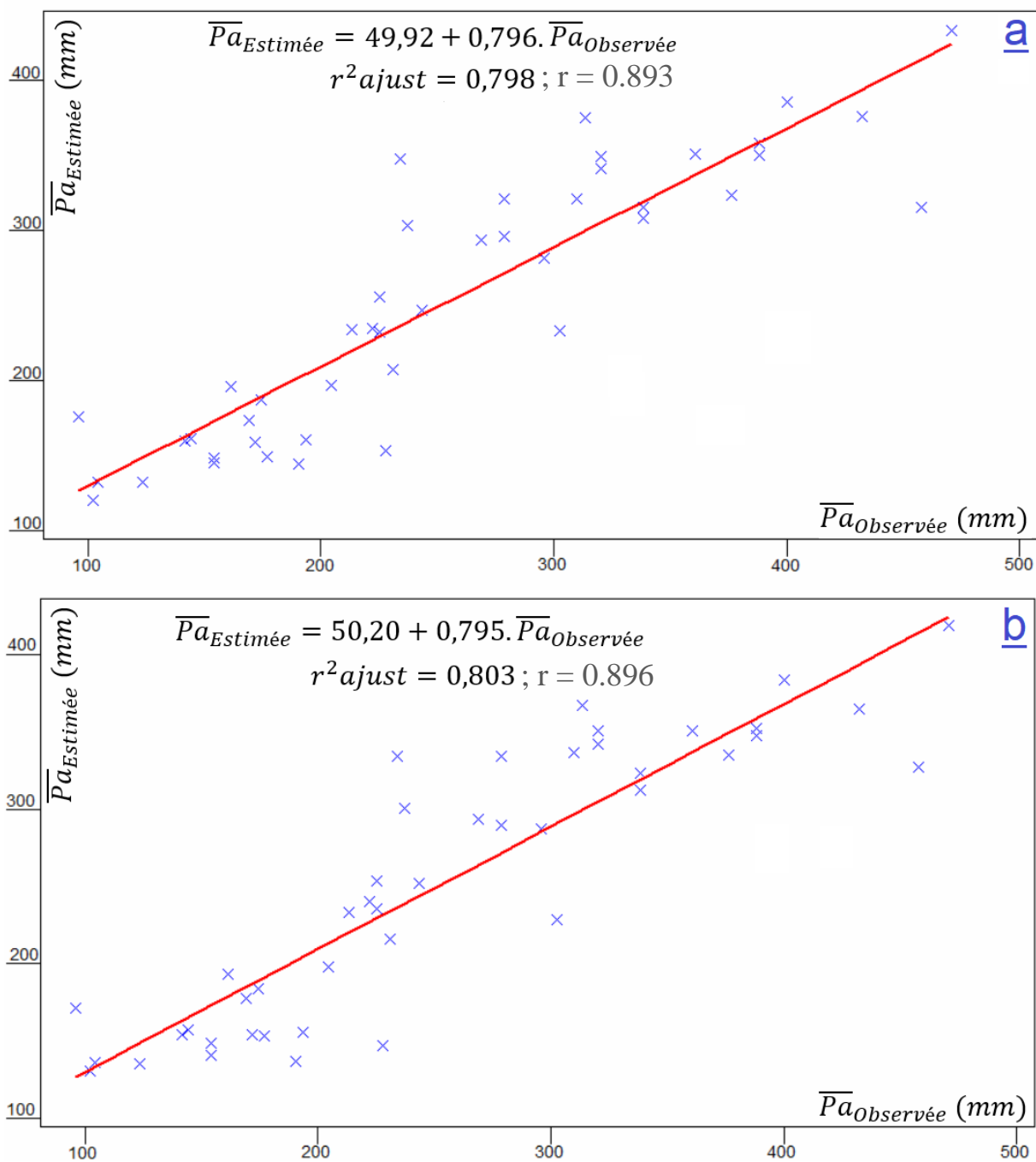


Figure II.5 : Régression entre les \overline{Pa} estimées et \overline{Pa} observées sur 44 postes pluviométriques

a : Equation (1) : $\sqrt{\overline{Pa}} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{liss}) + 3,32 (Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b : Equation (2) : $\sqrt{\overline{Pa}} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

II-2 Applications des méthodes d'interpolation à la cartographie des précipitations

Dans cette étude, nous avons sélectionné quelques méthodes qui sont les plus couramment utilisées dans l'interpolation spatiale ; elles sont implémentées dans la plus part des logiciels notamment SURFER[®], conçu par Golden Software (**Figure II.6**).

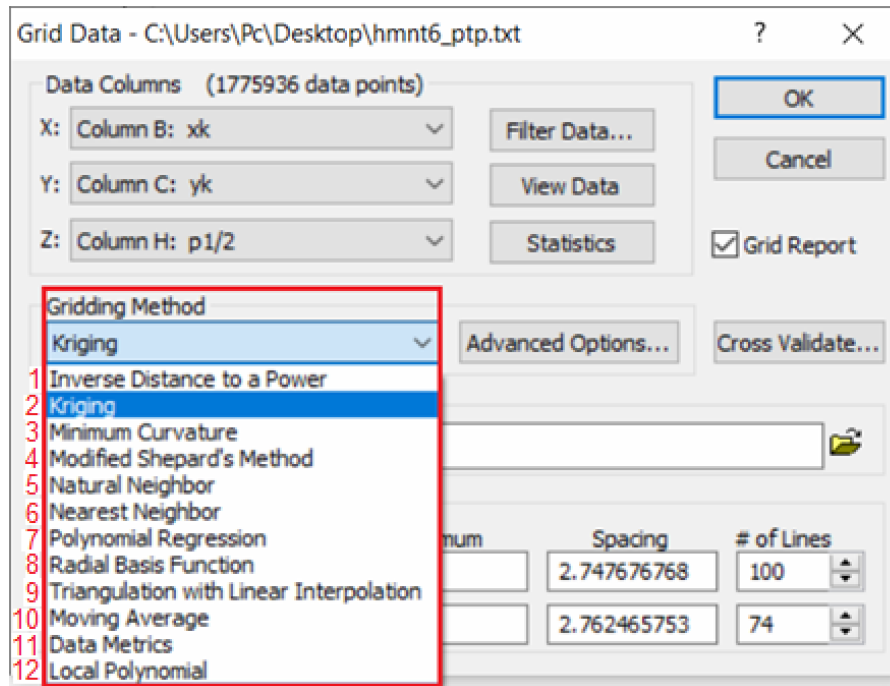


Figure II.6 : Méthodes interpolation implémentées dans SURFER 9

(1) Puissance Inverse des Distance, (2) krigeage, (3) : Courbure Minimale, (4)Shepard Modifiée, (5)Voisin Naturel, (6)Plus proche voisin, (7)Régression Polynomiale, (8) Fonction de base radiale, (9) Triangulation avec interpolation linéaire, (10) Moyenne Mobile, (11) Métriques de Données, (12)polynomiale locale.

L'interpolation des moyennes des racines carrées de pluies annuelles et des résidus de régression, calculés sur les 44 postes pluviométriques, a été effectuée aux nœuds d'une grille de 1 x 1 km². La mise en application a été effectuée par le logiciel SURFER[®] (version 9).

II-2-1 Méthode déterministes

Les résultats de ces algorithmes d'interpolation sont issus d'une règle de pondération calculée sur la base des valeurs observées aux sites de mesure voisins du nœud le plus proche .La plus simple est la polygonaion de Thiessen.

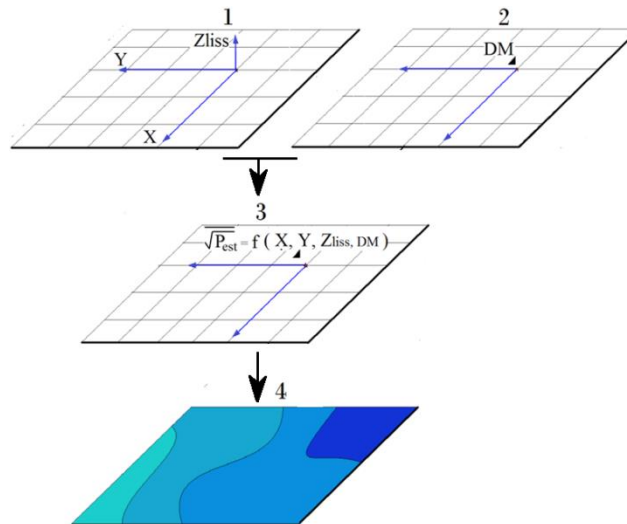


Figure II.7 : Etapes de réalisation de la cartographie des pluies annuelles pour l'approche déterministe

Méthode des polygones de Thiessen :

Proposée en 1911 par Thiessen, cette méthode d'interpolation spatiale, encore appelée le diagramme de Voronoi, est basée sur la loi du plus proche voisin. On affecte à chaque observation de chaque pluviomètre un polygone d'influence obtenu par le traçage des médiatrices des segments reliant les sites d'observation. Chaque point de polygone est plus proche de son site d'observation que de tout autre site (**Figure II.8**). À noter que, le découpage en polygones dépend uniquement de la répartition spatiale des sites d'observations.

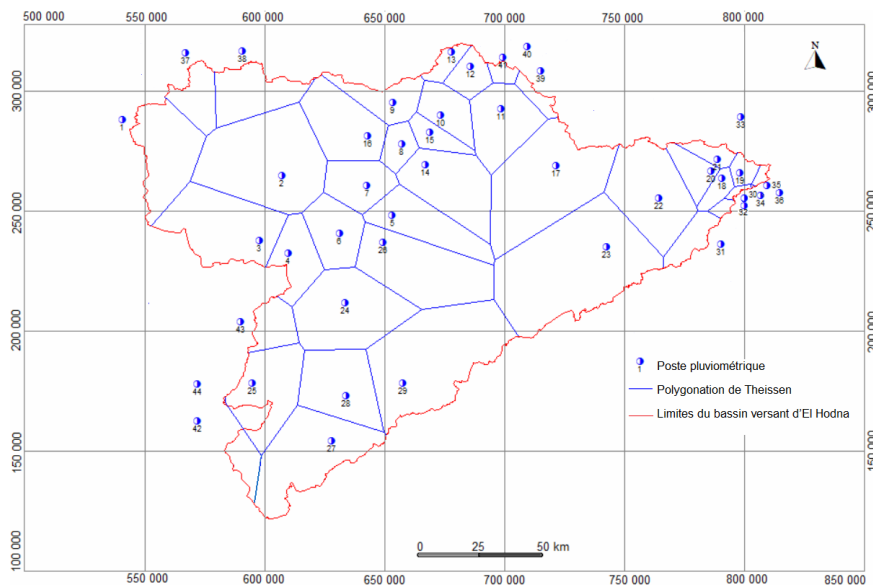


Figure II.8 : Polygones de Thiessen pour le bassin de Chott Hodna

autres méthodes d'interpolation déterministes ont été testées pour les deux cas, c.-à-d. pour les deux équations de régression retenues précédemment, soit : la puissance Inverse des Distance, la Courbure Minimale, le voisin Naturel, le plus proche voisin, la fonction de base radiale et la triangulation avec interpolation linéaire.

II-2-2 Méthode géostatistiques (le krigeage)

Le krigeage est largement préférée pour l'interpolation des précipitations. Parmi les avantages du krigeage par rapport à d'autres méthodes d'interpolation :

- Le krigeage intègre, dans son processus d'estimation, la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme.
- C'est un interpolateur exact puisque la surface obtenue passe par les points expérimentaux (sauf intégration d'un effet de pépite).

Les résultats du krigeage sont conditionnés par le calage d'un modèle de variogramme sur les données.

Variogrammes expérimentaux et modélisation théorique

Le variogramme brut expérimental $\gamma_g(h)$ exprime la variance des écarts entre les résidus de régression entre deux points distants de (h) , (Laborde, 1995). Il se fait en calculant la variance pour toutes les couples de points connus et par la suite la variance entre chaque point connu et tous les points à estimer (Meylan, 1986 in : Guidoum, 2017).

$$\gamma_g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \forall x \in D$$

Avec :

$N(h)$: Nombre de paires dont les points sont espacés de h .

Z : Une variable aléatoire de nature continue (la pluie annuelle dans notre cas) mesurée aux points x_1, \dots, x_n .

- Le vecteur $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{id})$ désigne la coordonnée du $i^{\text{ème}}$ point auquel on s'intéresse ; les points x_i appartiennent à un domaine $D : x_i \in D \subseteq R^d$

- Le vecteur distance h en deux points x_i et x_j est défini par :

$$h_{ij} = x_i - x_j = (x_{i1} - x_{j1}, \dots, x_{id} - x_{jd}).$$

Pour chacune des 44 stations pluviométriques retenues dans cette étude, nous avons calculé les résidus de régression des moyennes des racines carrées des pluies moyennes interannuelles ($\sqrt{\varepsilon}$) et nous avons tenté de mettre en évidence une structure spatiale. Le calcul du variogramme expérimental pour les deux équations de régression (1) et (2), nous a conduits à un nuage de points qui a été ajusté visuellement à un modèle théorique de type Exponentiel sans pépite (**Figures II.9 et II.10**) :

$$\text{Modèle exponentiel : } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-\left(\frac{|h|}{a}\right)} \right]$$

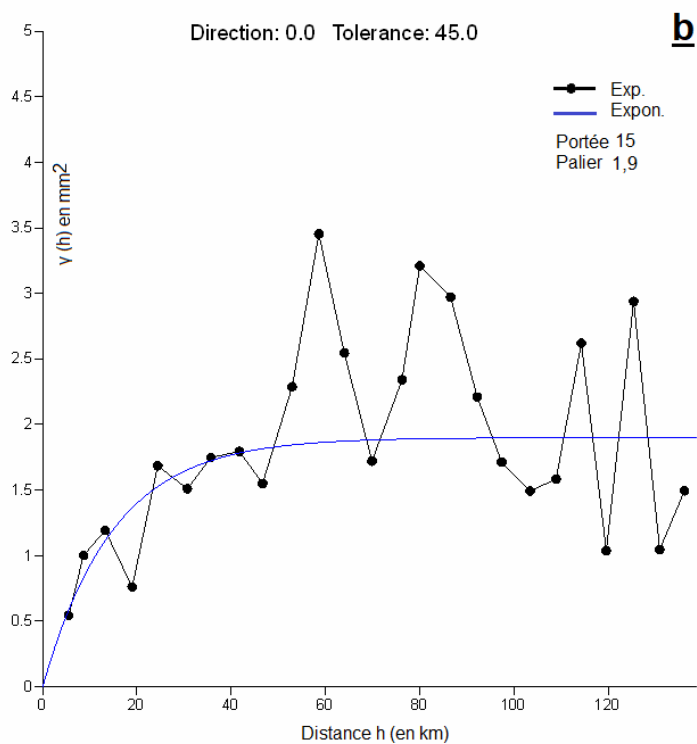
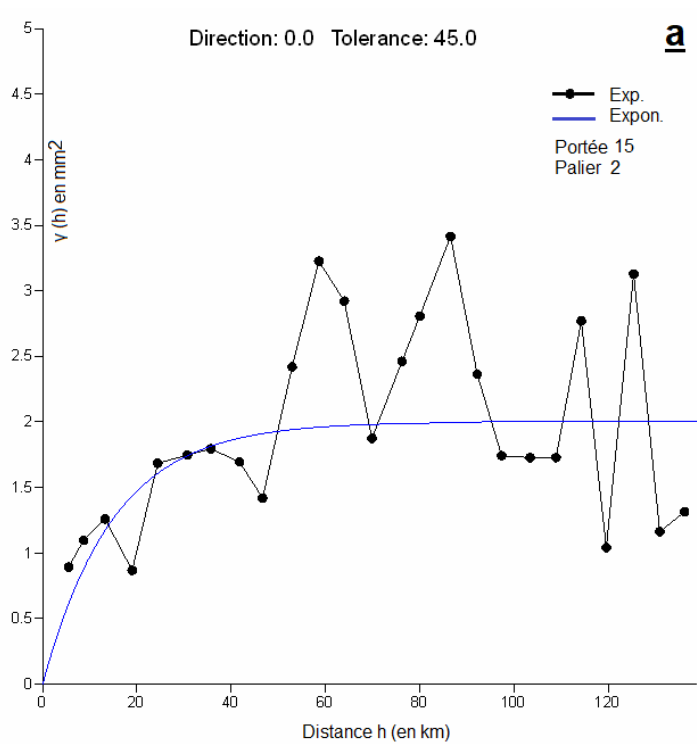
$\gamma(h)$: Variogramme théorique ; h : La distance moyenne inter-classe (km) ; C : Le palier (mm^2) ; a : la portée théorique du phénomène (km) ; C_0 : Effet de pépite.

Une fois le variogramme tracé et le modèle théorique ajusté, reste à passer à l'interpolation des résidus. Le but est d'obtenir une information continue de tout l'espace, en partant de valeurs ponctuelles.

Constitution de la grille finale et de la cartographie automatique

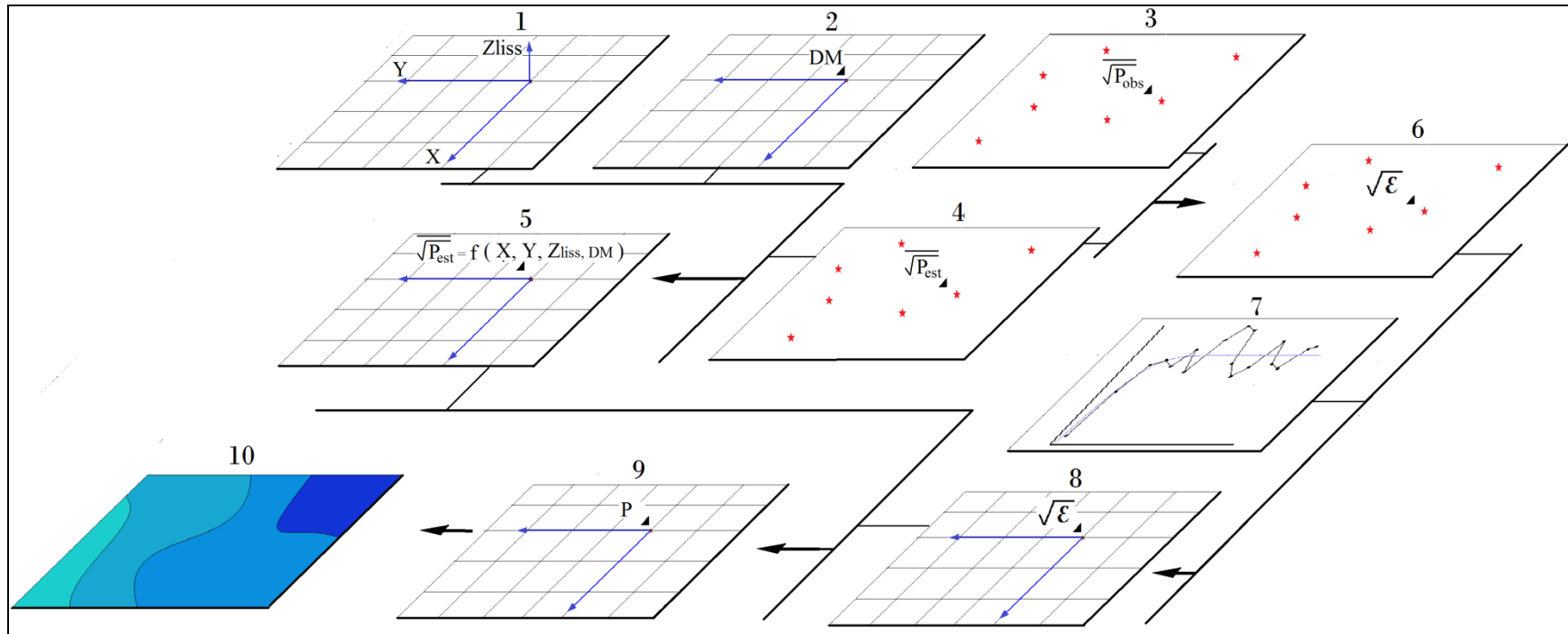
Les variables explicatives sélectionnées comme prédicateurs et les valeurs interpolées des résidus de la régression sont alors calculées pour tous les points d'une grille à maillage 1 x 1 km². L'équation $P = \left(\sqrt{\overline{P_i}} + \sqrt{\varepsilon} \right)^2$ appliquée à ces points, définit une grille finale des précipitations calculées. Cette dernière permet de tracer les courbes isohyètes.

Cette démarche a été appliquée pour l'élaboration des deux cartes ; Il s'agit des cartes des pluies moyennes annuelles (\overline{Pa}) pour l'équation de régression (1) et celle pour l'équation de régression (2). Ces cartes tiennent compte des incertitudes sur les estimations ponctuelles et valorisent l'information topo-géographique disponible. Un fonds hypsométrique issu du MNT et différents éléments d'habillage, peuvent être ajoutés en suite aux cartes réalisées.



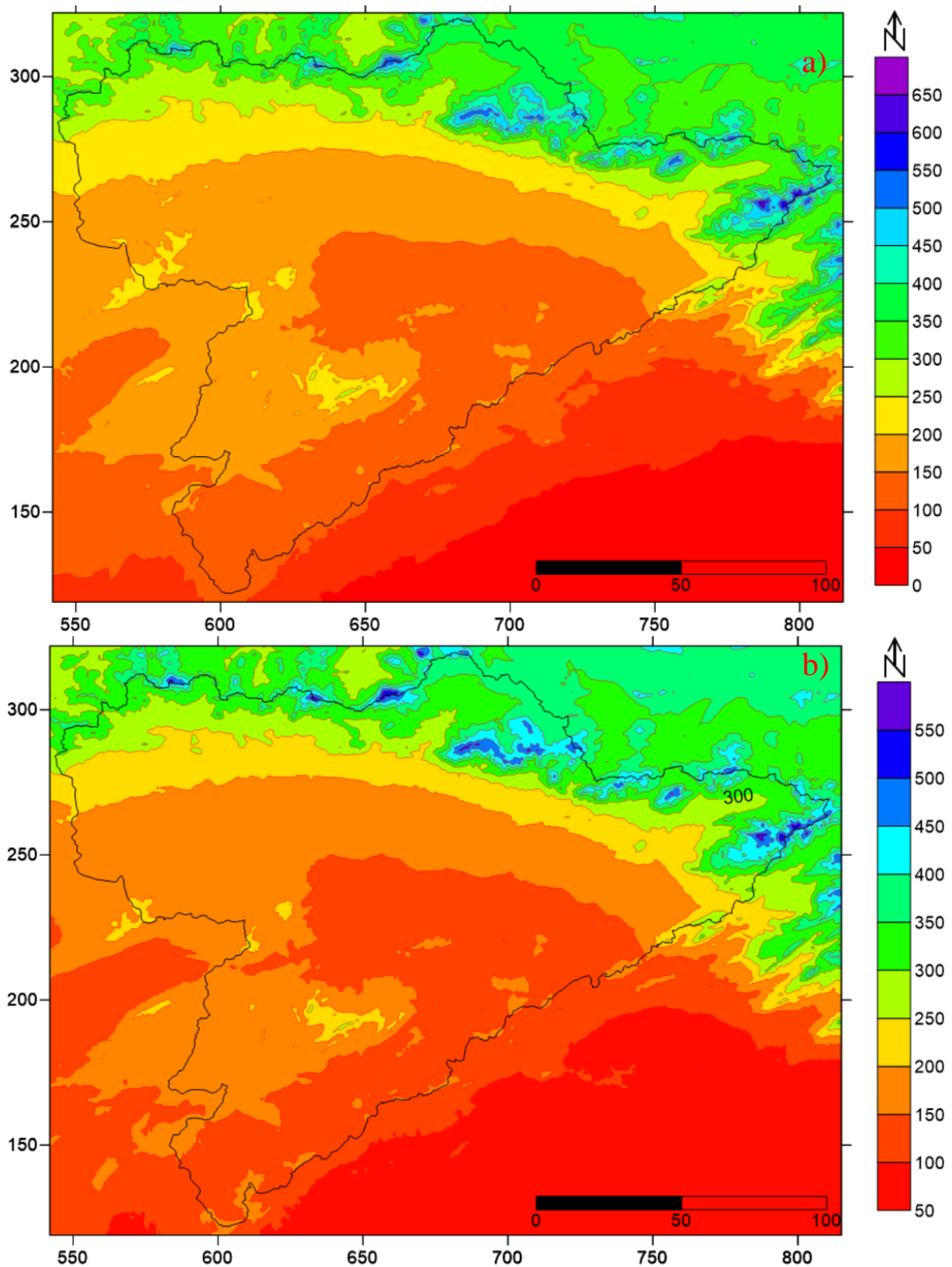
a : Equation de régression (1) : modèle exponentiel : portée = 15 km ; palier = 2 mm^2 ; pépité nulle à l'origine
b : Equation de régression (2) : modèle exponentiel : portée = 15 km ; palier = 1,9 mm^2 ; pépité nulle à l'origine

Figure II.9 : Variogrammes des résidus de régression (moyennes des racines carrées de pluies annuelles)



- 1 : Altitude lissée du point de coordonnées (X,Y) de la grille
- 2 : Distance à la mer du point de coordonnées (X,Y) de la grille
- 3 : Valeurs ponctuelles des moyennes des racines carrées des précipitations observées
- 4 : Valeurs ponctuelles des moyennes des racines carrées des précipitations estimées
- 5 : Moyenne des racines carrées des précipitations estimées du point de coordonnées (X,Y) de la grille
- 6 : Valeurs ponctuelles des résidus de régression $\sqrt{\epsilon} = \sqrt{P_{obs}} + \sqrt{P_{est}}$
- 7 : Variogramme expérimental des résidus de régression et modèle théorique adopté.
- 8 : Racine carrée du résidu de régression $\sqrt{\epsilon}$ du point de coordonnées (X,Y) de la grille.
- 9 : pluie $P = (\sqrt{P_{est}} + \sqrt{\epsilon})^2$ du point de coordonnées (X,Y) de la grille finale des précipitations
- 10 : Carte finale des précipitations

Figure II.10 : Etapes de réalisation de la cartographie des pluies annuelles pour l'approche géostatistique (Guidoum, 2017)

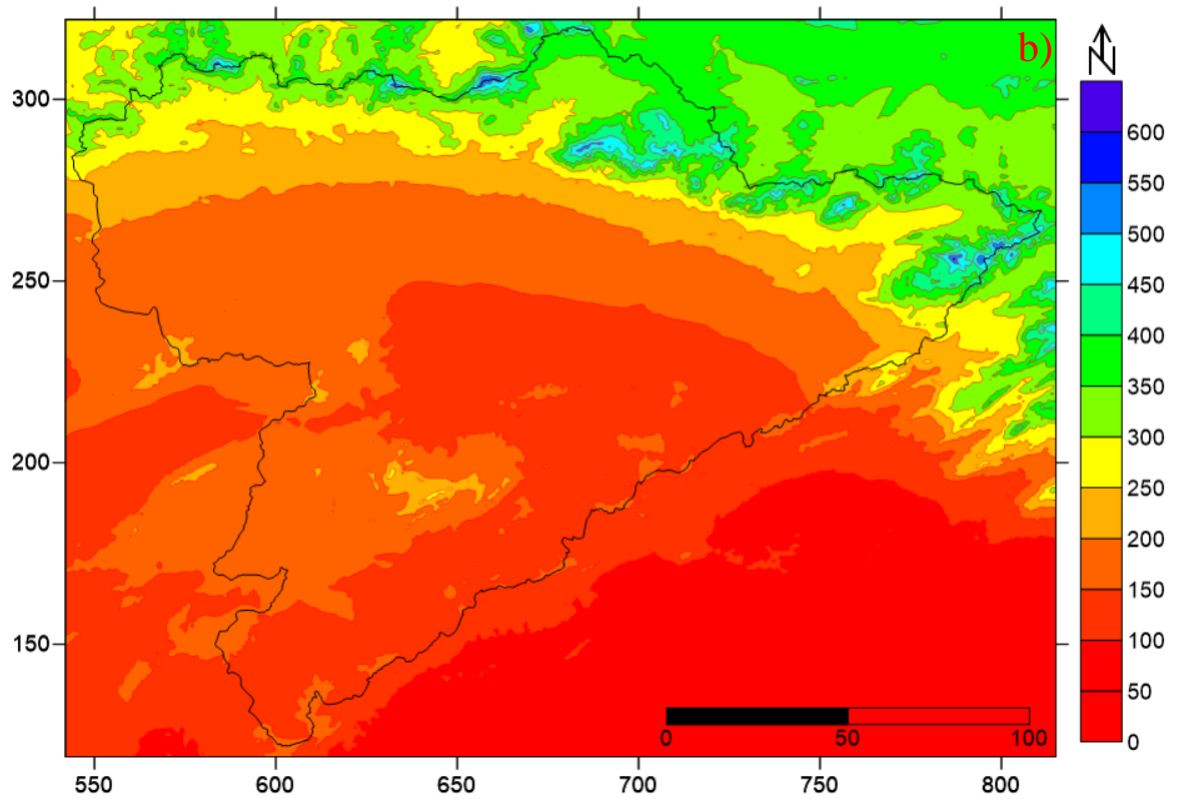
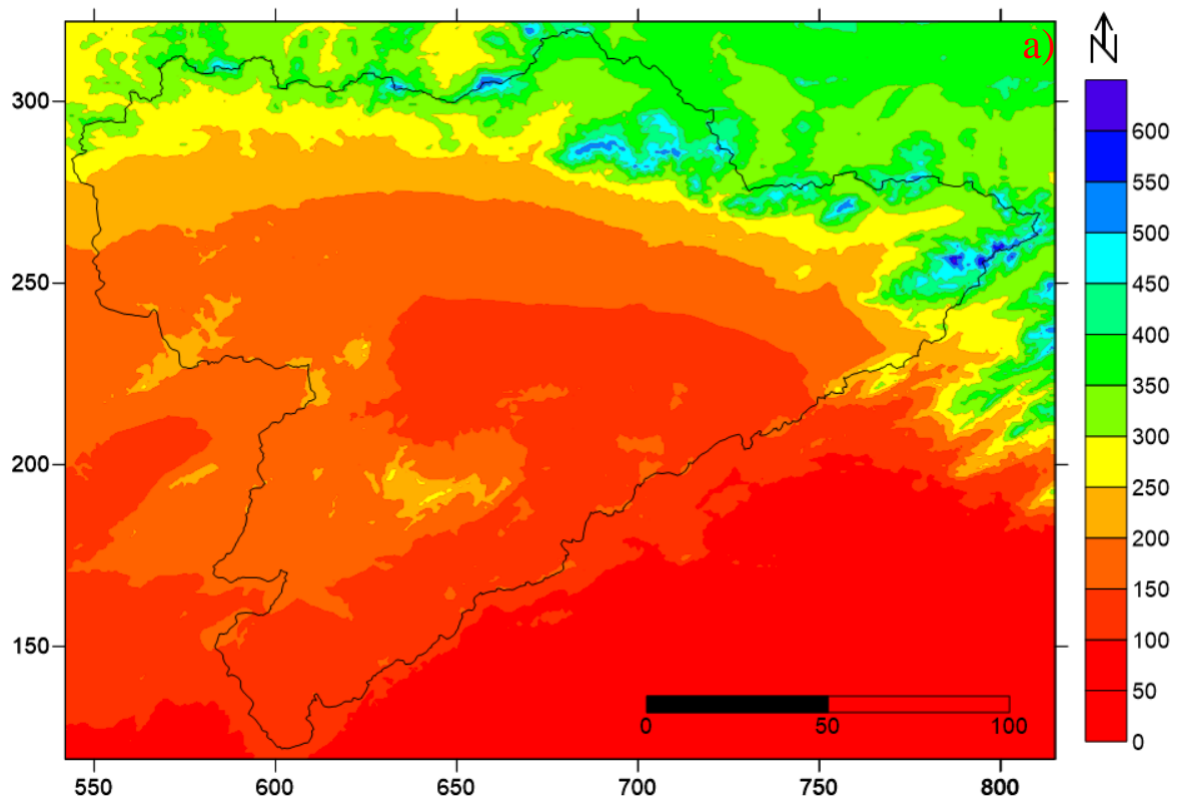


Méthode de la Puissance Inverse des Distance

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Zliss) + 3,32(Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104(Y) + 0,00606(Zliss) + 1,91(X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.11 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna(1975 - 2017)

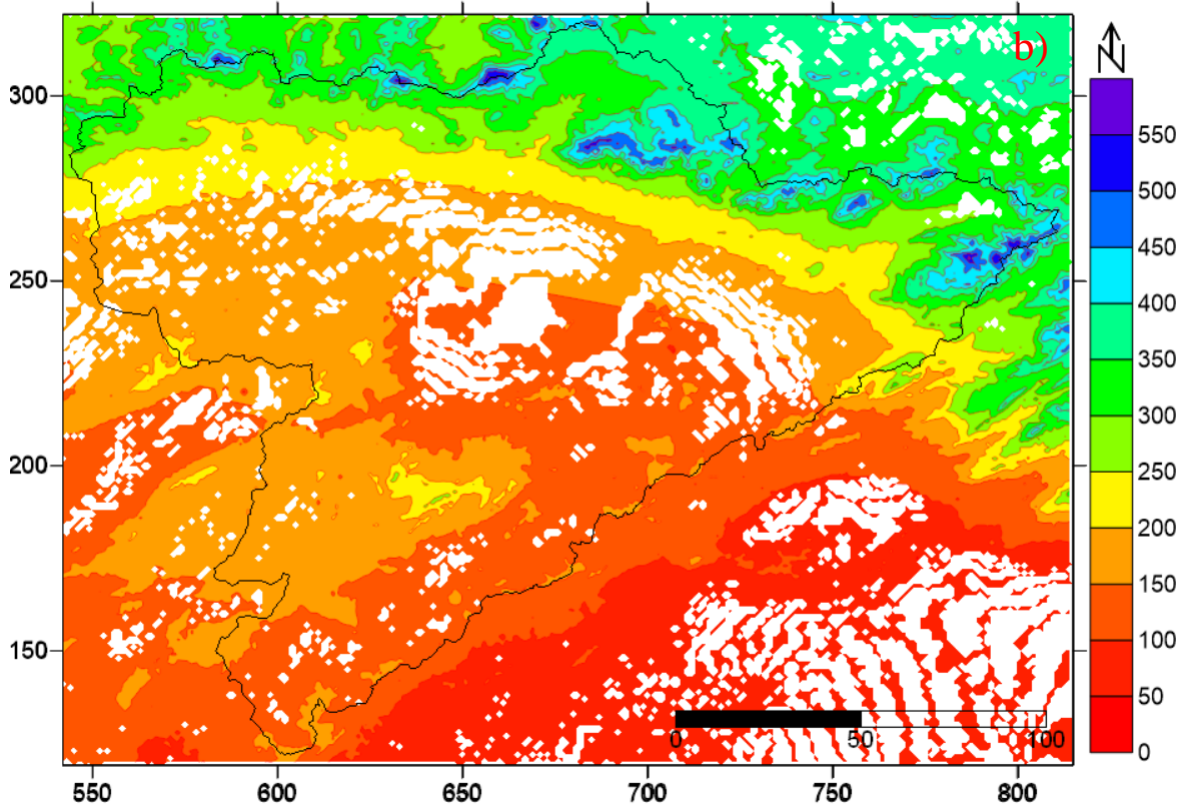
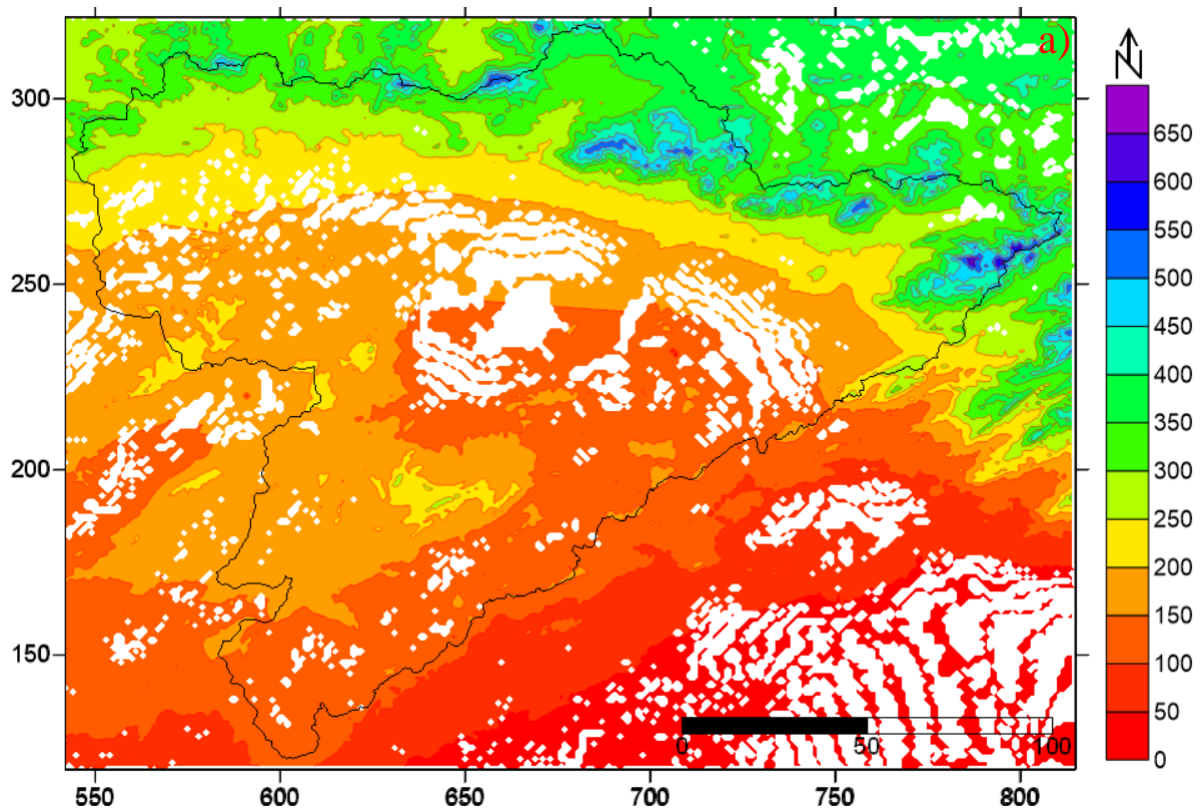


Méthode de krigeage (Approche déterministe)

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{liss}) + 3,32 (Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.12 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

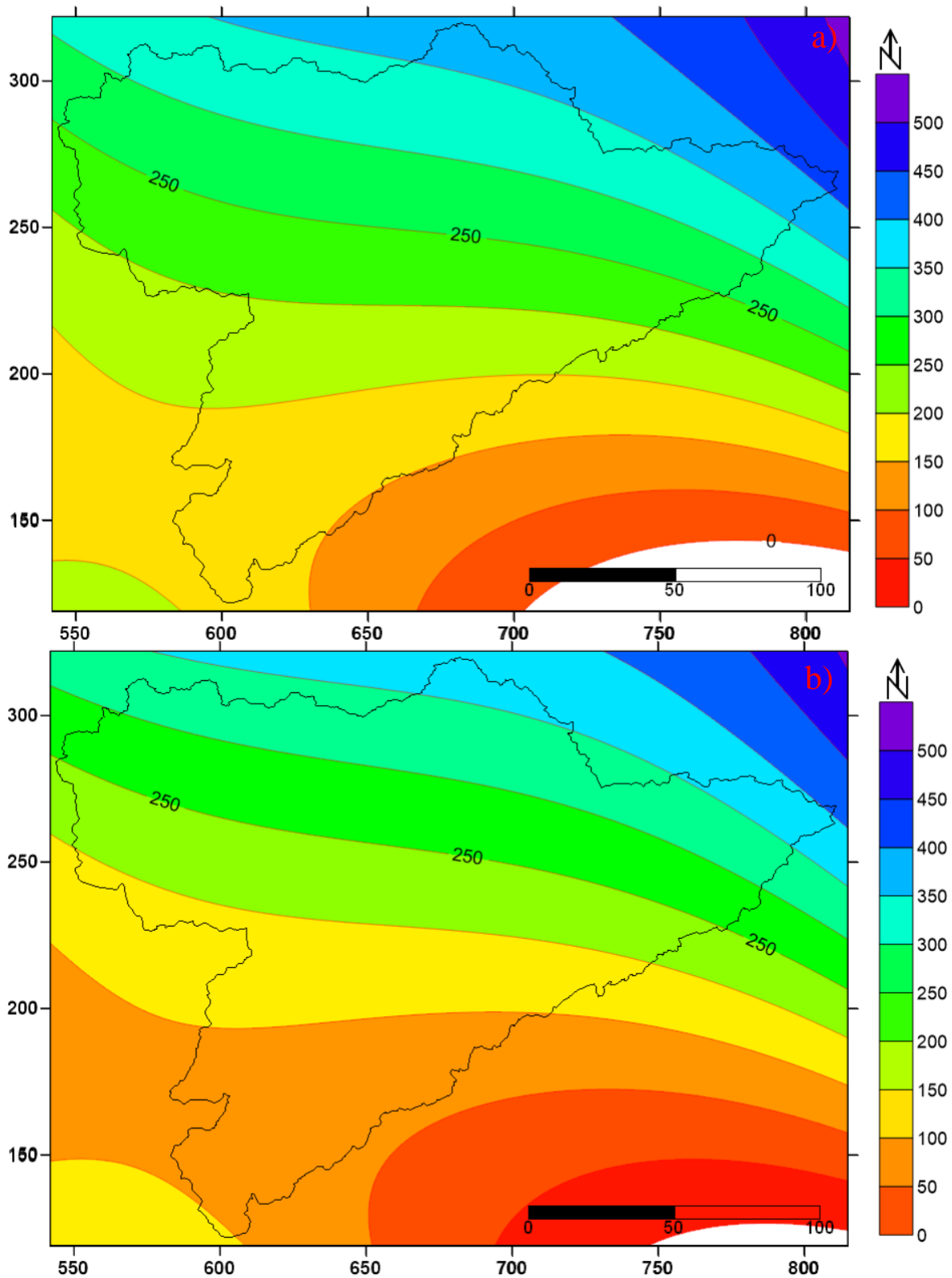


Méthode de Shepard Modifiée

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{\text{liess}}) + 3,32 (Z_{\text{liess}}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{\text{liess}}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.13 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

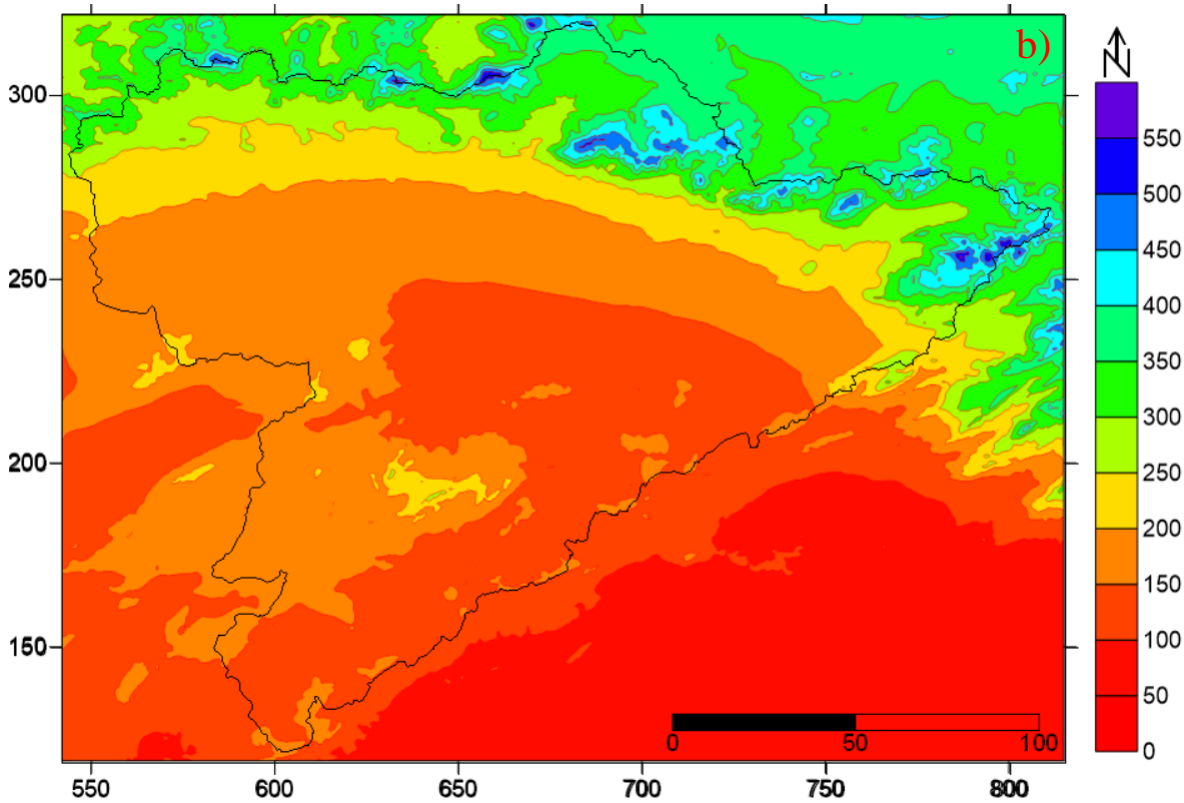
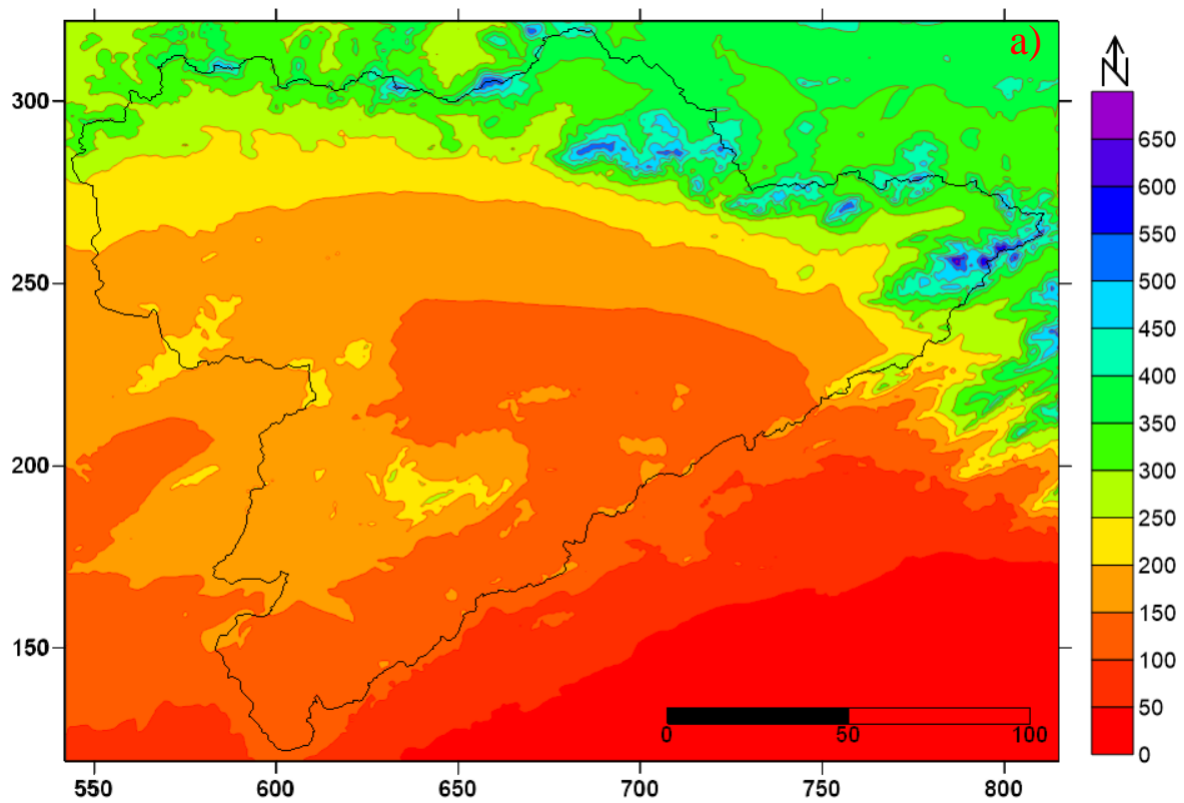


Méthode de Régression Polynomiale

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{\text{liiss}}) + 3,32 (Z_{\text{liiss}}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{\text{liiss}}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.14 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

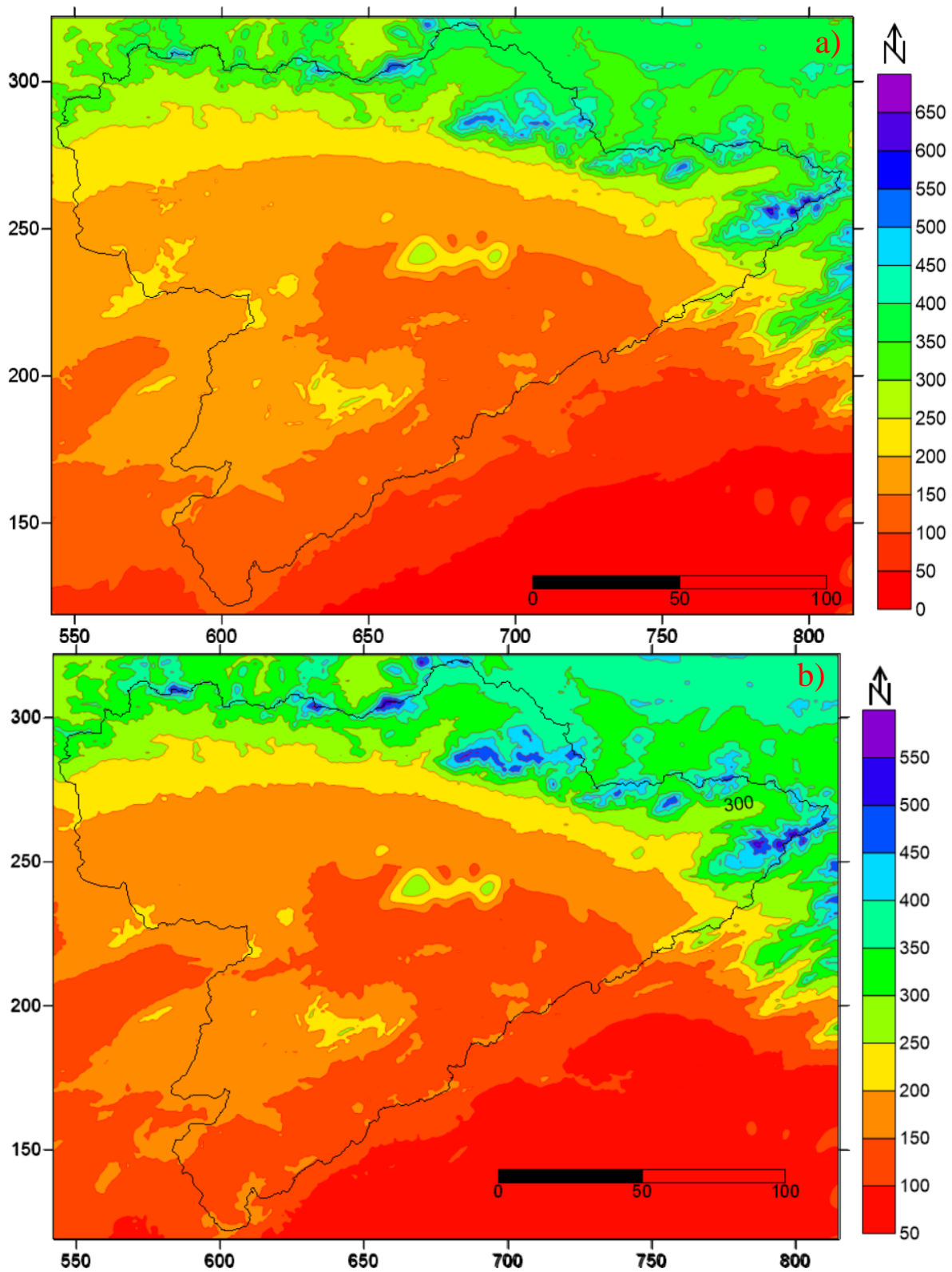


Méthode polynomiale locale

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{liss}) + 3,32 (Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.15 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

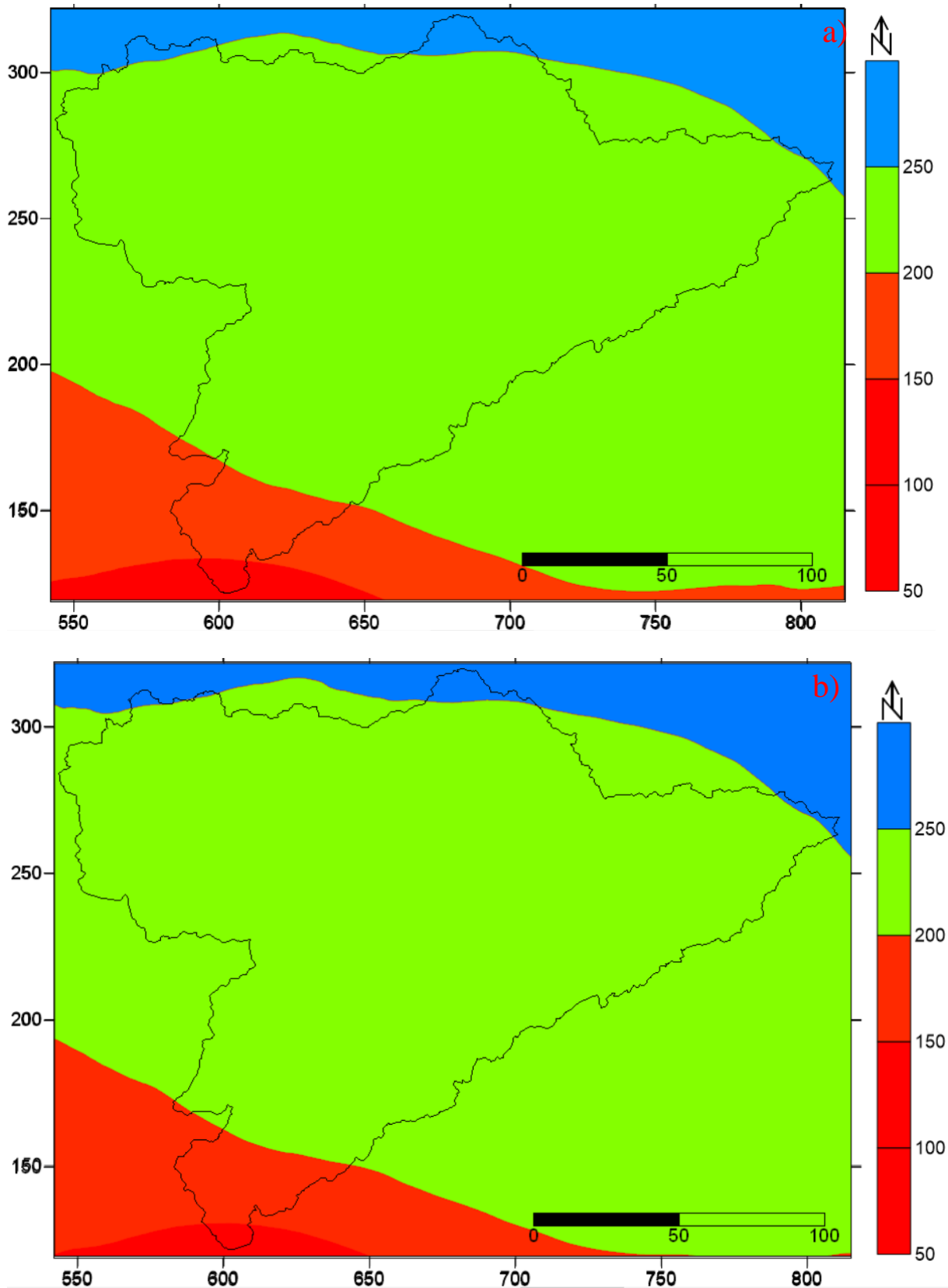


Méthode de la Courbure Minimale

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Z_{liss}) + 3,32(Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104(Y) + 0,00606(Z_{liss}) + 1,91(X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.16 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

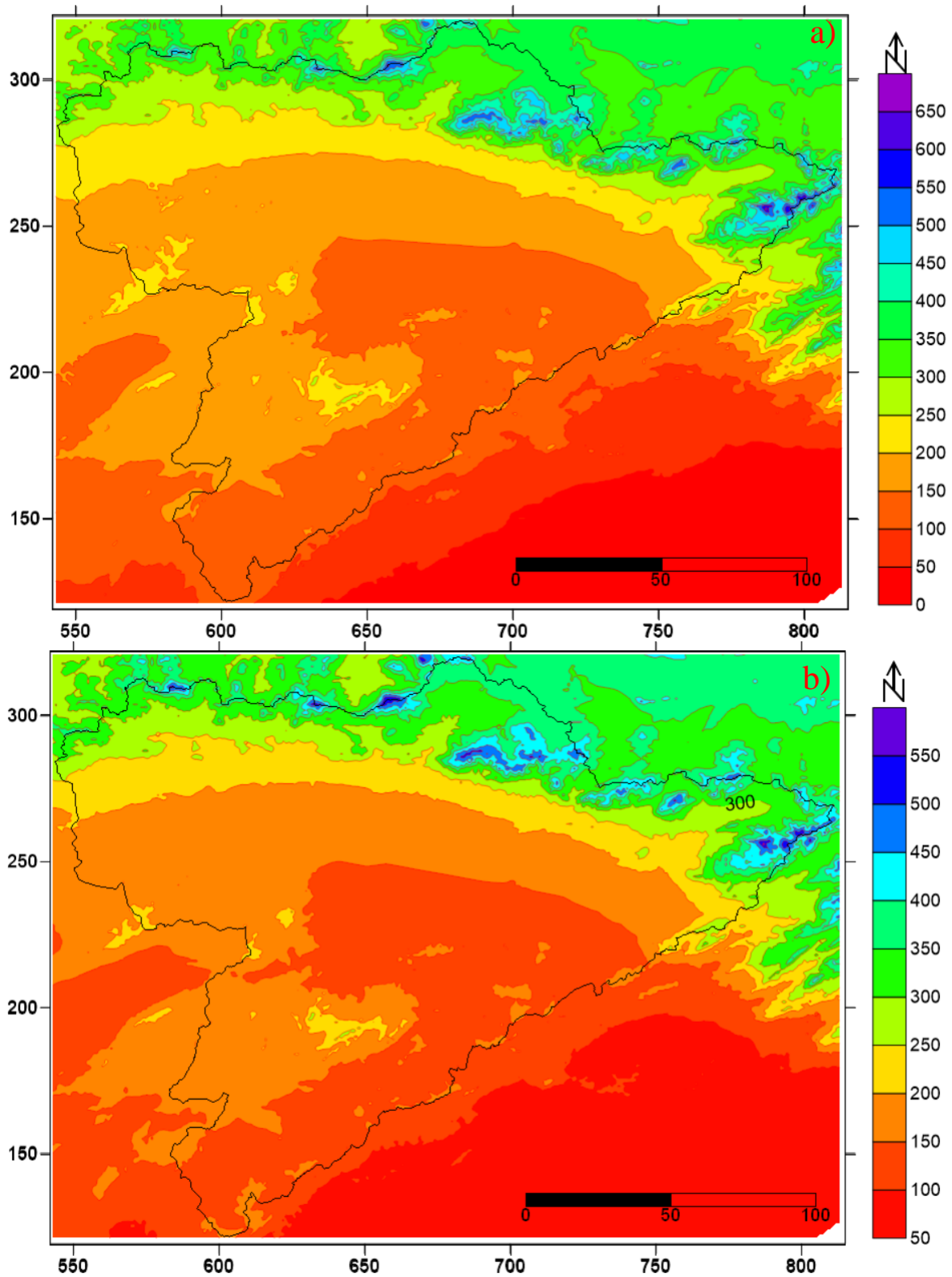


Méthode de la Moyenne Mobile

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Zliss) + 3,32 (Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Zliss) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.17 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

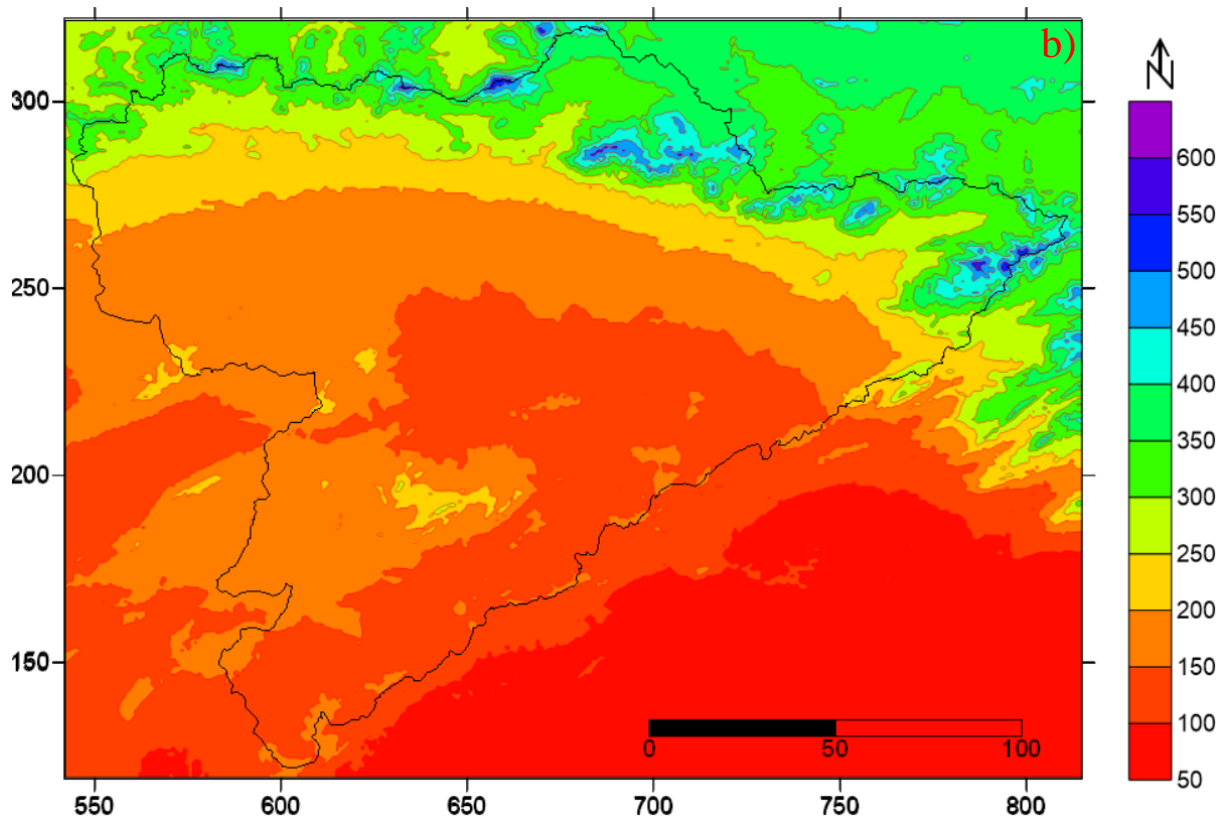
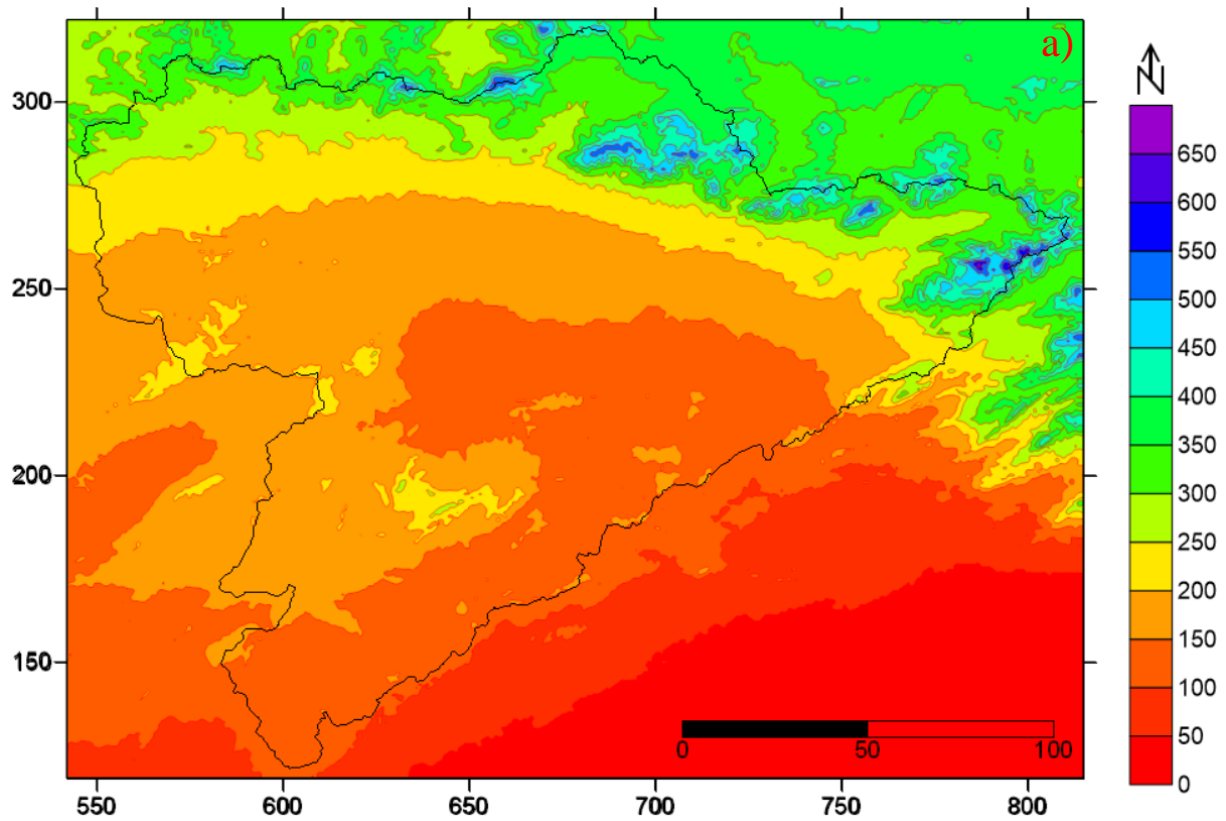


Méthode du Voisin Naturel

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{liss}) + 3,32 (Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.18 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

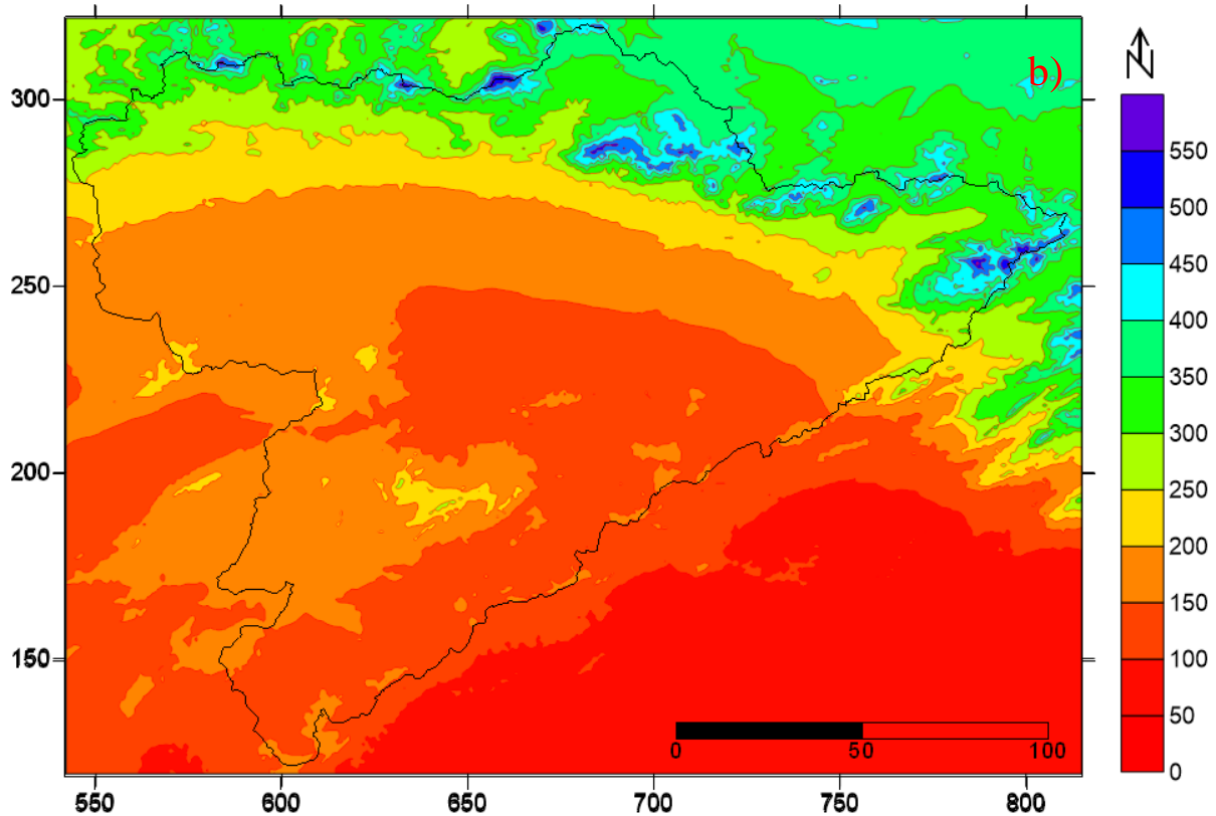
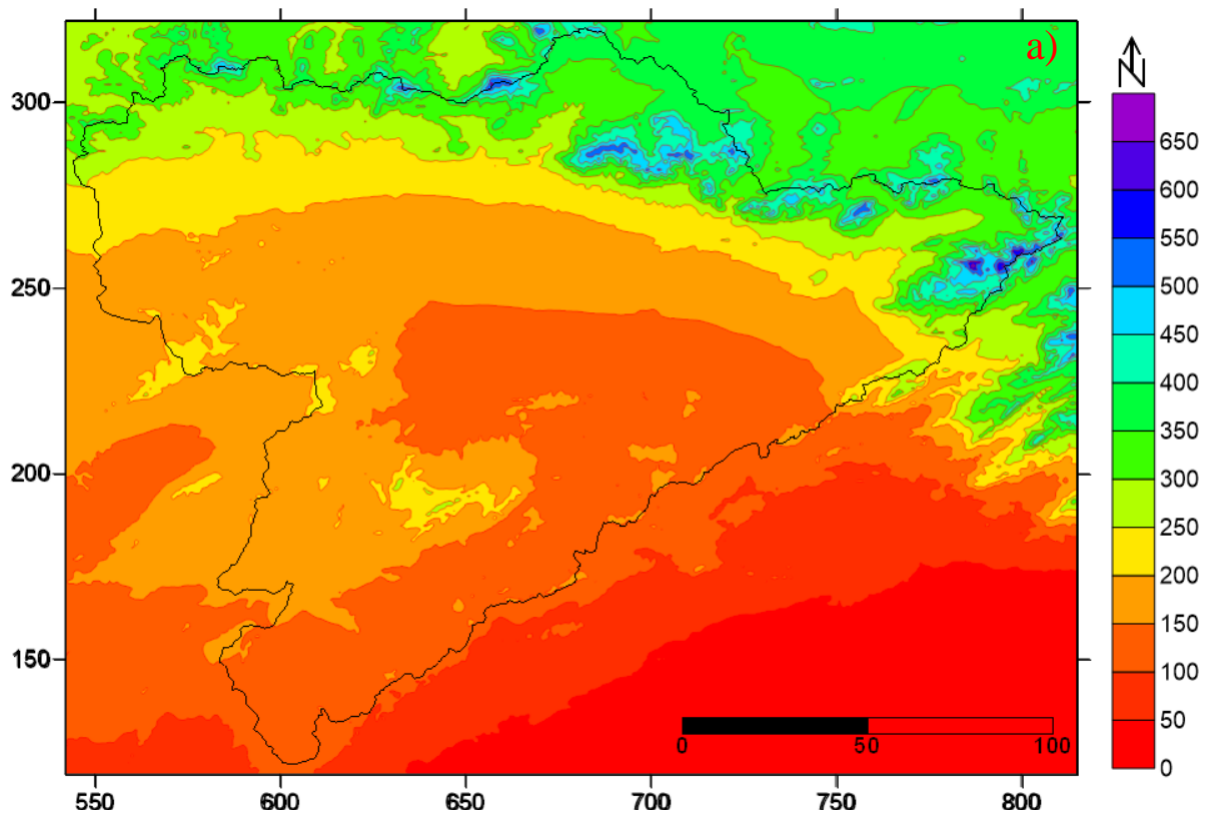


Méthode du Plus proche voisin

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{\text{liess}}) + 3,32 (Z_{\text{liess}}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{\text{liess}}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Figure II.19 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

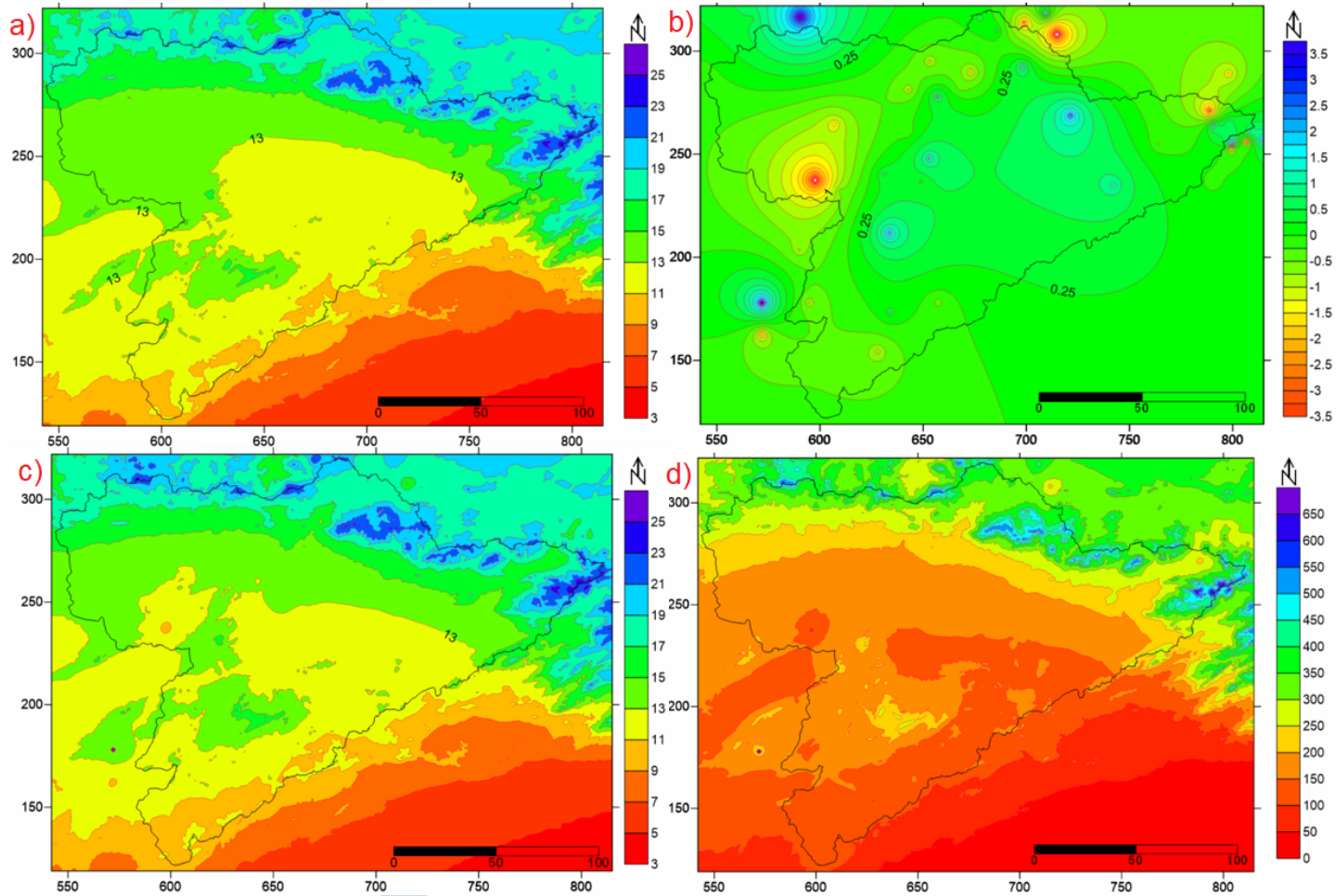


Méthode de Fonction à base radiale

a) : Equation (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z_{liss}) + 3,32 (Z_{liss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$

b) : Equation (2) : $\sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

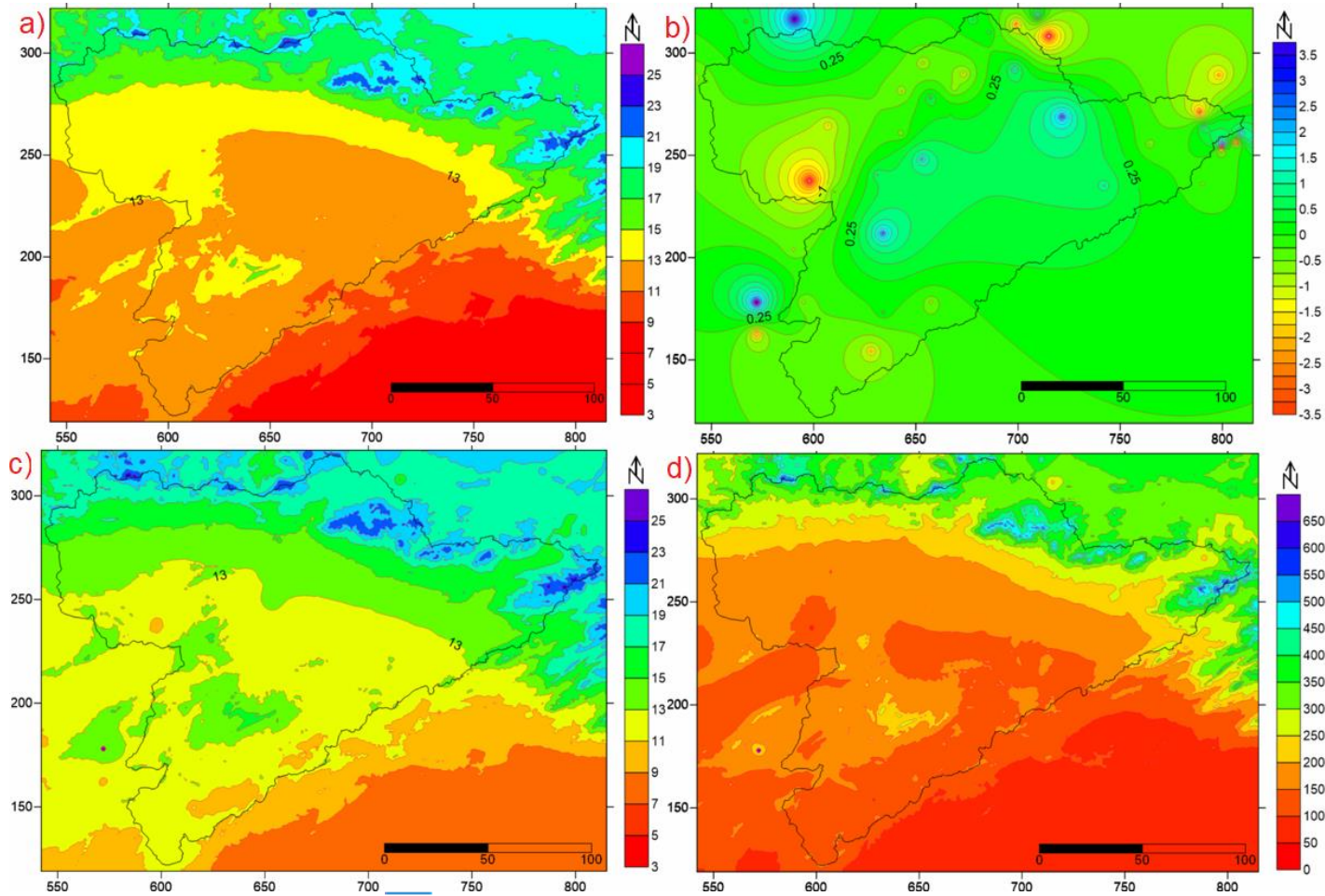
Figure II.20 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)



$$\text{Equation (1) : } \sqrt{P_a} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Z_{\text{liess}}) + 3,32(Z_{\text{liess}}/X) + 0,49\sqrt{DM}$$

- a) : Moyenne des racines carrées des pluies annuelles ($\sqrt{P_{est}}$) ; b) : Racine carrée du résidu de régression des moyennes des racines carrées des pluies annuelles ($\sqrt{\epsilon} = \sqrt{P_{obs}} - \sqrt{P_{est}}$) ; c) : Moyenne des racines carrées des pluies annuelles en tenant compte des résidu de régression ($\sqrt{P_a} = \sqrt{P_{est}} + \sqrt{\epsilon}$) ; d) : pluies moyenne annuelle du point de coordonnées (X,Y) de la grille finale des pluies ($P_a = (\sqrt{P_{est}} + \sqrt{\epsilon})^2$)

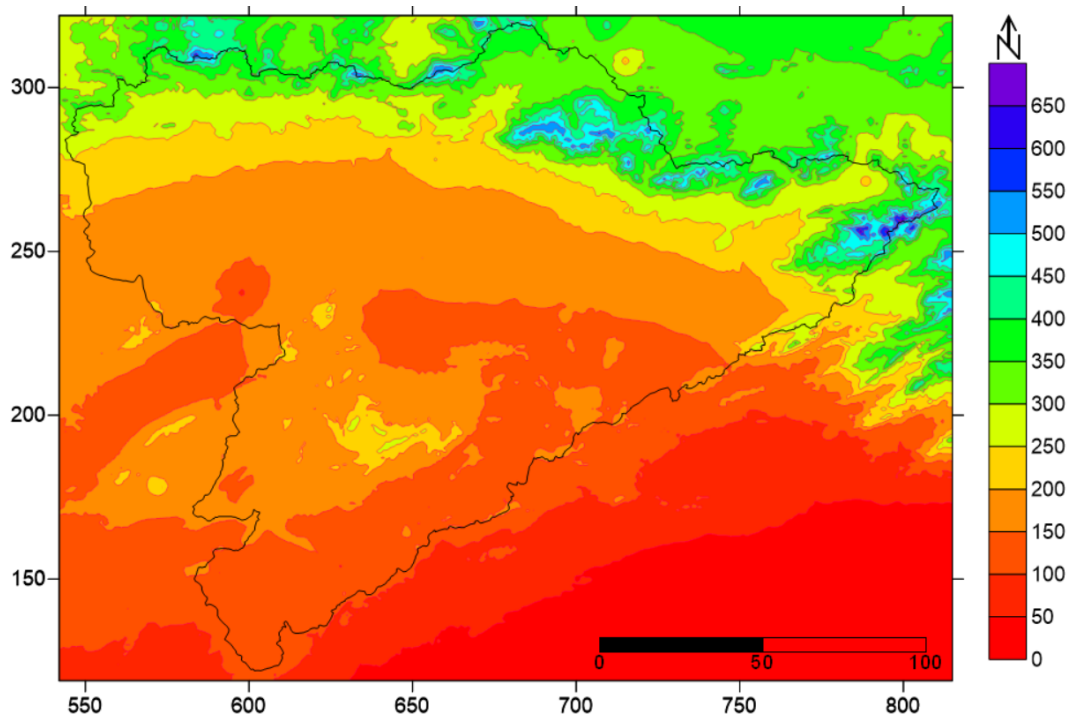
Figure II.21 : Etablissement de la cartes des pluies annuelles (1975-2017)



$$\text{Equation (2)} : \sqrt{Pa} = -31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{\text{liiss}}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$$

- a) : Moyenne des racines carrées des pluies annuelles ($\sqrt{P_{est}}$) ; b) : Racine carrée du résidu de régression des moyennes des racines carrées des pluies annuelles ($\sqrt{\epsilon} = \sqrt{P_{obs}} - \sqrt{P_{est}}$) ; c) : Moyenne des racines carrées des pluies annuelles en tenant compte des résidu de régression ($\sqrt{Pa} = \sqrt{P_{est}} + \sqrt{\epsilon}$) ; d) : pluies moyenne annuelles du point de coordonnées (X,Y) de la grille finale des pluies ($Pa = (\sqrt{P_{est}} + \sqrt{\epsilon})^2$)

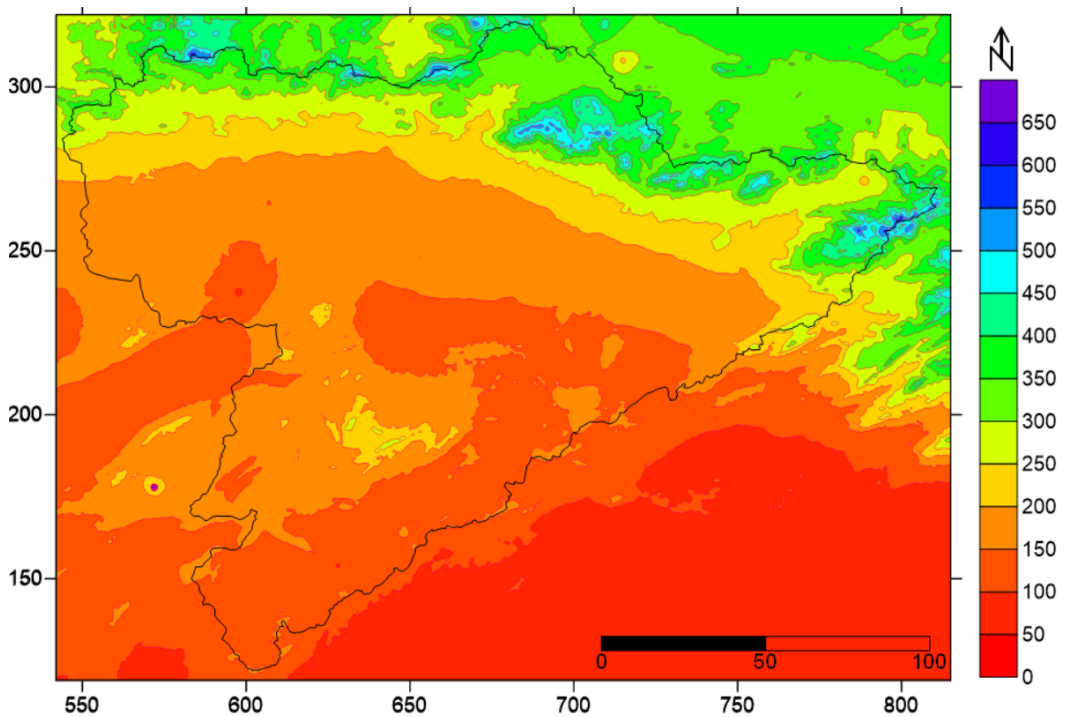
Figure II.22 : Etablissement de la cartes des pluies annuelles (1975-2017)



Méthode de Krigeage (Approche stochastique)

$$\text{Equation (1) : } \sqrt{Pa} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Z\text{liiss}) + 3,32 (Z\text{liiss}/X) + 0,49\sqrt{DM}$$

Figure II.23: Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)



Méthode de Krigeage (Approche stochastique)

$$\text{Equation (2) : } \sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z\text{liiss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$$

Figure II.24 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

II-3 Analyse comparative des résultats

Après l'établissement des grille par interpolation spatiale à l'aide des 12 méthodes de spatialisation retenues, à partir des données recueillies par les 44 pluviomètres du bassin du Chott Hodna et afin de tester et comparer la représentativité de ces différentes méthodes, une validation a été réalisée en utilisant 17 postes pluviométriques « test ».

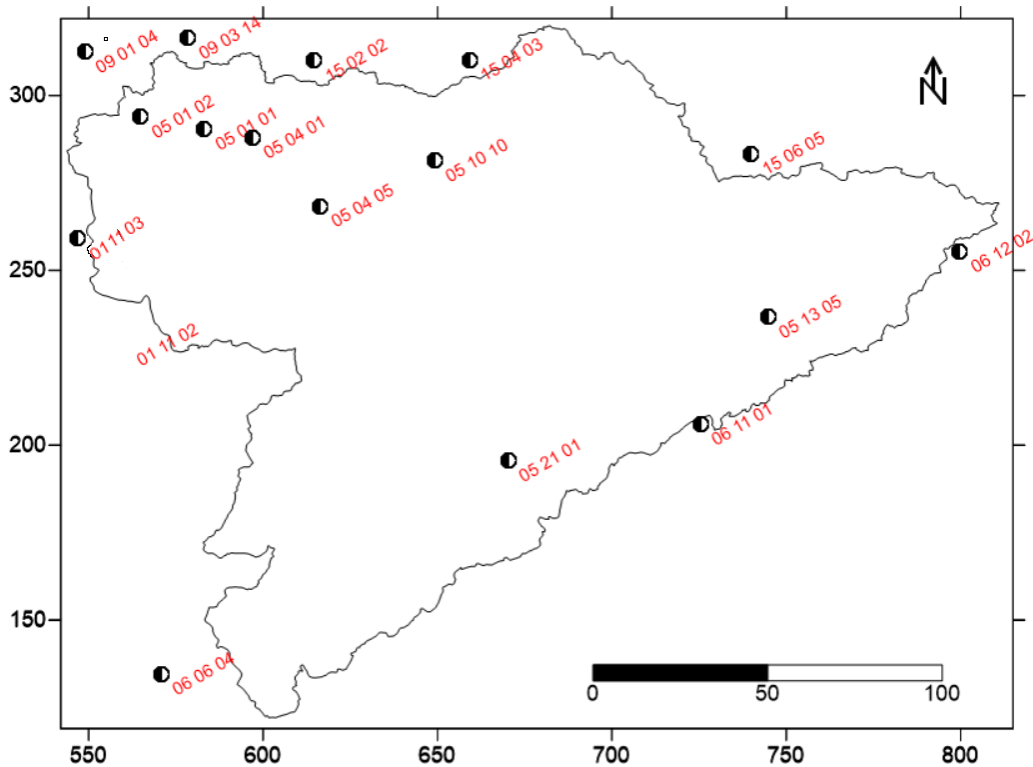


Figure II.25 : Répartition géographique des postes pluviométriques « test »

Pour chacune des douze (12) méthodes d'interpolation, il a été considéré les valeurs de pluie observées (V_o), les valeurs de pluie prédites (V_p), les erreurs quadratiques moyennes (EQM) et les erreurs moyennes absolues (EMA), (Tableaux II.2 (a) et (b), Tableaux II.3 (a) et (b)).

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_p - V_o)^2}$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |V_p - V_o|$$

Où V_p : Valeur de pluie prédite ; V_o : Valeur de pluie observée ; N : nombre de postes pluviométriques à valider.

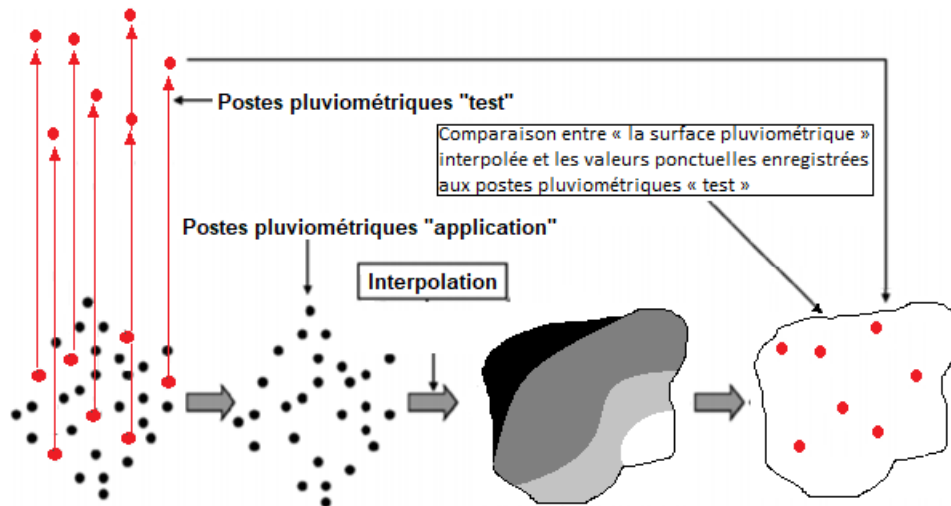


Figure II.26 : Schéma explicatif des étapes de la validation des résultats de l'interpolation spatiale

D'une méthode d'interpolation à l'autre, l' EQM varie de façon importante, soit entre 7,12 mm et 75,27 mm pour l'équation de régression (1) et entre 9,39 mm et 76,23 mm pour l'équation de régression (2).

La méthode d'interpolation du krigeage en tenant compte de la composante stochastique, produit l'erreur EQM le plus faible pour les deux variantes de régression, tandis que les erreurs EQM des méthodes de la régression Polynomiale et de la moyenne Mobile sont les plus élevées.

L'autre méthode sont une différence de moins de 1,5 mm (variante de régression 1) et 5 mm (variante de régression 1) avec la valeur du krigeage sans composante stochastiques.

En comparant les tracés des isohyètes obtenus par les différentes méthodes (**Figure II.11, II.12** , , ... et **II.26**), la constatation qui s'impose est que les tracés sont semblables pour la majorité des méthodes déterministes.

Toutefois, les courbes obtenues par les méthodes de la régression polynomiale et de la courbure Minimale sont « excessivement lissées » et d'une forme différente de celles obtenues par les autres méthodes. Aussi, comme la montre la **Figure 2.13**, la méthode de Shepard Modifiée produit des « des aires creux et vides » importantes.

En somme, la différence de niveau de représentativité entre les méthodes d'interpolation déterministes et stochastiques (krigeage) a assurément affecté les résultats obtenus par ces méthodes dans l'évaluation (spatialisation) des pluies moyennes annuelles du bassin de Chott Hodna. En plus, le krigeage en tenant compte de la composante stochastique est le plus efficace dans la représentation des pluies moyenne du bassin étudié. En effet, ce type d'interpolation, prend en considération la structure de dépendance spatiale des données.

De ce fait, nous avons retenu la carte des pluies annuelles produite par krigeage en tenant compte de la composante stochastique, et ceci en utilisant l'équation de régression multiple $\overline{\sqrt{Pa}} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Zliss) + 3,32 (Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$.

Code	Poste pluv.	X (km)	Y (km)	Z (m)	Puissance Inverse des Distance		EQM	EMA	Krigeage (Approche déterministe)		EQM	EMA	Shepard Modifiée		EQM	EMA	Régression Polynomiale		EQM	EMA	Triangulation avec interpolation linéaire		EQM	EMA	polynomiale locale		EQM	EMA		
					Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo				
01 11 02	Zenzach	560,75	228,75	940	182,81	175,50	22,44	16,25	182,79	175,50	23,72	16,25	183,58	175,50	23,35	15,63	181,39	175,50	49,24	37,75	182,75	175,50	23,24	16,49	182,27	175,50	21,73	16,08		
01 11 03	Birine	545,75	259,6	750	207,41	207,11			207,85	207,11			207,88	207,11			210,98	207,11			210,98	207,11			207,77	207,11			205,74	207,11
05 01 01	A. Nessissa	583,25	290,35	680	240,77	250,70			240,14	250,70			240,35	250,70			293,10	250,70			293,10	250,70			240,36	250,70			241,77	250,70
05 01 02	CH. El Adaoura	565	293,8	990	289,86	296,90			290,33	296,90			290,39	296,90			286,18	296,90			286,18	296,90			290,36	296,90			288,59	296,90
05 04 01	Sidi Aissa	597,05	287,95	662	237,39	250,91			237,24	250,91			237,26	250,91			297,94	250,91			297,94	250,91			237,26	250,91			238,70	250,91
05 13 05	Attouta Barr.	744,85	236,6	471	164,11	179,84			164,08	179,84			164,38	179,84			253,84	179,84			253,84	179,84			164,40	179,84			163,75	179,84
09 01 04	Souagui	548,95	312,4	810	283,14	300,20			282,82	300,20			282,05	300,20			301,04	300,20			301,04	300,20			282,50	300,20			283,82	300,20
09 03 14	Dechmya	578,5	316,35	850	320,85	360,15			320,16	360,15			320,11	360,15			332,41	360,15			332,41	360,15			320,25	360,15			321,12	360,15
15 02 02	B. Okhriss	614,7	309,9	750	289,61	316,00			289,66	316,00			289,60	316,00			340,66	316,00			340,66	316,00			289,60	316,00			290,09	316,00
15 04 03	Mansoura	659,2	310,1	700	303,92	290,75			302,62	290,75			302,89	290,75			353,19	290,75			353,19	290,75			302,69	290,75			305,35	290,75
05 04 05	Ouled Tagueb	616,45	268,4	505	190,53	170,80			189,65	170,80			168,45	170,80			272,51	170,80			272,51	170,80			190,51	170,80			190,83	170,80
05 10 10	DJ.Taref	649,25	281,3	592	224,13	215,90			223,24	215,90			222,71	215,90			305,13	215,90			305,13	215,90			222,93	215,90			224,15	215,90
05 21 01	Ben S'Rour	670,3	195,6	720	142,55	145,70			141,30	145,70			142,88	145,70			147,83	145,70			147,83	145,70			141,66	145,70			142,76	145,70
06 06 04	Moudjebara	570,9	134,65	1046	99,76	100,20			99,83	100,20			99,77	100,20			145,88	100,20			145,88	100,20			99,89	100,20			100,07	100,20
06 11 01	M'Doukel	725,5	206	435	115,24	140,70			112,98	140,70			115,00	140,70			167,03	140,70			167,03	140,70			113,89	140,70			114,79	140,70
06 12 02	Oued Chaaba	799,8	255,35	1278	375,67	439,50	369,05	439,50	368,03	439,50	367,56	439,50	367,56	439,50	371,54	439,50	379,88	439,50												
15 06 05	Oued Teben	740	283,3	1030	350,99	345,35	349,94	345,35	349,94	345,35	350,56	345,35	350,56	345,35	349,96	345,35	352,15	345,35												

Vp : Valeur prédite ; Vo : Valeur observée ; EQM : Erreur quadratique ; EMA : Erreur moyen absolue

Tableau II.2 (a) : Erreur quadratique moyenne (mm) et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques “test” pour chacune des méthodes

d'interpolation spatiale : Equation de régression (1) : $\sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Zliss) + 3,32(Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$

Code	Poste pluv.	X (km)	Y (km)	Z (m)	Courbure Minimale		EQM	EMA	Moyenne Mobile		EQM	EMA	Voisin Naturel		RMSE	EMA	Plus proche voisin		EQM	EMA	Fonction de base radiale		EQM	EMA	Krigage (Approche stochastique)		EQM	EMA		
					Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo				
01 11 02	Zenzach	560,75	228,75	940	183,09	175,50	20,93	16,05	214,05	175,50	75,27	61,79	182,72	175,50	23,31	16,51	183,80	175,50	23,41	16,69	172,38	175,50	23,79	16,73	172,36	175,50	7,12	5,85		
01 11 03	Birine	545,75	259,6	750	206,00	207,11			225,25	207,11			207,74	207,11			208,11	207,11			208,11	207,11			199,54	207,11			201,73	207,11
05 01 01	A. Nessissa	583,25	290,35	680	240,36	250,70			235,20	250,70			240,36	250,70			240,24	250,70			240,24	250,70			234,95	250,70			250,36	250,70
05 01 02	CH. El Adaoura	565	293,8	990	289,20	296,90			243,15	296,90			290,26	296,90			290,78	296,90			290,78	296,90			291,34	296,90			298,92	296,90
05 04 01	Sidi Aissa	597,05	287,95	662	237,24	250,91			229,90	250,91			237,26	250,91			237,35	250,91			237,35	250,91			231,76	250,91			243,71	250,91
05 13 05	Attouta Barr.	744,85	236,6	471	164,58	179,84			232,58	179,84			164,10	179,84			163,99	179,84			163,99	179,84			169,91	179,84			185,01	179,84
09 01 04	Souagui	548,95	312,4	810	283,35	300,20			255,68	300,20			283,01	300,20			280,92	300,20			280,92	300,20			285,75	300,20			292,65	300,20
09 03 14	Dechmya	578,5	316,35	850	322,07	360,15			258,79	360,15			320,22	360,15			318,99	360,15			318,99	360,15			324,17	360,15			367,41	360,15
15 02 02	B. Okhriss	614,7	309,9	750	290,61	316,00			247,68	316,00			289,60	316,00			289,58	316,00			289,58	316,00			289,08	316,00			310,81	316,00
15 04 03	Mansoura	659,2	310,1	700	306,85	290,75			252,78	290,75			302,64	290,75			304,35	290,75			304,35	290,75			302,67	290,75			299,32	290,75
05 04 05	Ouled Tagueb	616,45	268,4	505	190,49	170,80			225,37	170,80			190,46	170,80			190,44	170,80			190,44	170,80			181,9	170,80			175,46	170,80
05 10 10	DJ.Taref	649,25	281,3	592	224,78	215,90			236,93	215,90			223,00	215,90			223,02	215,90			223,02	215,90			219,31	215,90			218,72	215,90
05 21 01	Ben S'Rour	670,3	195,6	720	141,91	145,70			228,62	145,70			141,61	145,70			142,87	145,70			142,87	145,70			139,68	145,70			147,21	145,70
06 06 04	Moudjebara	570,9	134,65	1046	99,87	100,20			153,75	100,20			99,86	100,20			99,73	100,20			99,73	100,20			114,33	100,20			95,57	100,20
06 11 01	M'Doukel	725,5	206	435	114,55	140,70			228,04	140,70			113,85	140,70			115,37	140,70			115,37	140,70			120,06	140,70			121,60	140,70
06 12 02	Oued Chaaba	799,8	255,35	1278	385,24	439,50			243,93	439,50			371,11	439,50			371,60	439,50			371,60	439,50			356,24	439,50			447,25	439,50
15 06 05	Oued Teben	740	283,3	1030	353,02	345,35	241,71	345,35	349,98	345,35	350,03	345,35	350,03	345,35	342,99	345,35	352,53	345,35												

Vp : Valeur prédite ; Vo : Valeur observée ; EQM : Erreur quadratique moyenne ; EMA : Erreur moyen absolue

Tableau II.2 (b) : Erreur quadratique moyenne (mm) et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques “test” pour chacune des méthodes

d'interpolation spatiale : Equation de régression (1) : $\sqrt{Pa} = - 12,6 + 0,0666 (Y) + 0,0113 (Zliss) + 3,32 (Zliss/X) + 0,49\sqrt{DM}$

Code	Poste pluv.	X (km)	Y (km)	Z (m)	Puissance Inverse des Distance		EQM	EMA	Krigage (Approche déterministe)		EQM	EMA	Shepard Modifiée		EQM	EMA	Régression Polynomiale		EQM	EMA	Triangulation avec interpolation linéaire		EQM	EMA	polynomiale locale		RMSE	EMA
					Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo		
01 11 02	Zenzach	560,75	228,75	940	172,38	175,50	24,13	16,73	172,36	175,50	25,27	17,11	173,23	175,50	25,66	17,43	172,24	175,50	47,87	37,05	172,32	175,50	24,85	16,96	171,79	175,50	23,37	16,48
01 11 03	Birine	545,75	259,6	750	199,16	207,11			199,53	207,11			199,56	207,11			204,90	207,11			199,44	207,11			197,11	207,11		
05 01 01	A. Nessissa	583,25	290,35	680	235,61	250,70			234,93	250,70			235,15	250,70			288,65	250,70			235,16	250,70			236,68	250,70		
05 01 02	CH. El Adaoura	565	293,8	990	290,87	296,90			291,39	296,90			291,45	296,90			285,14	296,90			291,42	296,90			289,46	296,90		
05 04 01	Sidi Aissa	597,05	287,95	662	231,62	250,91			231,76	250,91			231,79	250,91			291,80	250,91			231,76	250,91			233,18	250,91		
05 13 05	Attouta Barr.	744,85	236,6	471	169,92	179,84			169,90	179,84			170,17	179,84			248,38	179,84			170,19	179,84			169,58	179,84		
09 01 04	Souagui	548,95	312,4	810	286,13	300,20			285,76	300,20			284,86	300,20			310,32	300,20			285,39	300,20			286,91	300,20		
09 03 14	Dechmya	578,5	316,35	850	324,91	360,15			324,27	360,15			324,21	360,15			339,08	360,15			324,36	360,15			325,18	360,15		
15 02 02	B. Okhriss	614,7	309,9	750	289,02	316,00			289,08	316,00			289,01	316,00			341,43	316,00			289,01	316,00			289,52	316,00		
15 04 03	Mansoura	659,2	310,1	700	303,92	290,75			302,66	290,75			302,92	290,75			352,57	290,75			302,72	290,75			305,30	290,75		
05 04 05	Ouled Tagueb	616,45	268,4	505	183,65	170,80			181,83	170,80			190,67	170,80			261,48	170,80			182,70	170,80			183,02	170,80		
05 10 10	DJ.Taref	649,25	281,3	592	220,34	215,90			219,45	215,90			218,94	215,90			296,11	215,90			219,15	215,90			220,37	215,90		
05 21 01	Ben S'Rour	670,3	195,6	720	140,85	145,70			139,68	145,70			141,18	145,70			147,01	145,70			140,02	145,70			141,06	145,70		
06 06 04	Moudjebara	570,9	134,65	1046	114,28	100,20			114,34	100,20			114,27	100,20			160,31	100,20			114,42	100,20			113,18	100,20		
06 11 01	M'Doukel	725,5	206	435	122,23	140,70			120,11	140,70			122,12	140,70			168,98	140,70			120,96	140,70			121,73	140,70		
06 12 02	Oued Chaaba	799,8	255,35	1278	362,05	439,50			356,54	439,50			355,69	439,50			356,45	439,50			358,61	439,50			365,55	439,50		
15 06 05	Oued Teben	740	283,3	1030	343,89	345,35	342,97	345,35	342,98	345,35	342,19	345,35	343,00	345,35	344,92	345,35												

Vp : Valeur prédite ; Vo : Valeur observée ; RMSE : Erreur quadratique moyenne ; EMA : Erreur moyen absolue

Tableau II.3 (a) : Erreur quadratique moyenne (mm) et erreur moyenne absolues des postes pluviométriques “test” pour chacune des méthodes

d'interpolation spatiale : Equation de régression (2) : $\sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Zliss) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

Code	Poste pluvi.	X (km)	Y (km)	Z (m)	Courbure Minimale		EQM	EMA	Moyenne Mobile		EQM	EMA	Voisin Naturel		EQM	EMA	Plus proche voisin		EQM	EMA	Fonction de base radiale		EQM	EMA	Krigage (Approche stochastique)		EQM	EMA
					Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo			Vp	Vo		
01 11 02	Zenzach	560,75	228,75	940	172,69	175,50	22,94	16,98	215,17	175,50	76,23	63,08	172,28	175,50	24,91	16,97	173,46	175,50	24,97	16,97	172,38	175,50	25,34	17,13	162,49	175,50	9,39	8,05
01 11 03	Birine	545,75	259,6	750	197,49	207,11			225,23	207,11			199,41	207,11			199,82	207,11			199,54	207,11			190,39	207,11		
05 01 01	A. Nessissa	583,25	290,35	680	235,16	250,70			234,29	250,70			235,16	250,70			235,03	250,70			234,95	250,70			241,31	250,70		
05 01 02	CH. El Adaoura	565	293,8	990	280,15	296,90			241,14	296,90			291,30	296,90			291,89	296,90			291,34	296,90			294,08	296,90		
05 04 01	Sidi Aissa	597,05	287,95	662	231,78	250,91			229,73	250,91			231,79	250,91			231,89	250,91			231,76	250,91			235,70	250,91		
05 13 05	Attouta Barr.	744,85	236,6	471	170,36	179,84			233,45	179,84			169,92	179,84			169,82	179,84			169,91	179,84			187,77	179,84		
09 01 04	Souagui	548,95	312,4	810	286,35	300,20			252,25	300,20			285,97	300,20			283,57	300,20			285,75	300,20			288,95	300,20		
09 03 14	Dechmya	578,5	316,35	850	326,17	360,15			255,11	360,15			324,32	360,15			322,98	360,15			324,17	360,15			364,10	360,15		
15 02 02	B. Okhriss	614,7	309,9	750	290,05	316,00			245,34	316,00			289,01	316,00			289,00	316,00			289,08	316,00			306,67	316,00		
15 04 03	Mansoura	659,2	310,1	700	306,74	290,75			250,58	290,75			302,68	290,75			304,33	290,75			302,67	290,75			298,98	290,75		
05 04 05	Ouled Tagueb	616,45	268,4	505	182,63	170,80			226,05	170,80			182,64	170,80			182,54	170,80			181,90	170,80			168,73	170,80		
05 10 10	DJ.Taref	649,25	281,3	592	221,09	215,90			236,86	215,90			219,22	215,90			219,23	215,90			219,31	215,90			212,85	215,90		
05 21 01	Ben S'Rour	670,3	195,6	720	140,24	145,70			229,92	145,70			139,97	145,70			141,13	145,70			139,68	145,70			145,11	145,70		
06 06 04	Moudjebara	570,9	134,65	1046	114,43	100,20			157,15	100,20			114,38	100,20			114,25	100,20			114,33	100,20			108,08	100,20		
06 11 01	M'Doukel	725,5	206	435	121,61	140,70			229,08	140,70			120,92	140,70			122,38	140,70			120,06	140,70			127,51	140,70		
06 12 02	Oued Chaaba	799,8	255,35	1278	369,99	439,50			244,75	439,50			358,25	439,50			358,67	439,50			356,24	439,50			449,99	439,50		
15 06 05	Oued Teben	740	283,3	1030	345,67	345,35	242,00	345,35	343,01	345,35	343,05	345,35	342,99	345,35	347,14	345,35												

Vp : Valeur prédite ; Vo : Valeur observée ; EQM : Erreur quadratique moyenne ; EMA : Erreur moyen absolue

Tableau II.3 (b) : Erreur quadratique moyenne (mm) et erreur moyenne absolue des postes pluviométriques “test” pour chacune des méthodes d’interpolation spatiale : Equation de régression (2) : $\sqrt{Pa} = - 31,4 + 0,104 (Y) + 0,00606 (Z_{liss}) + 1,91 (X/Y) + 0,846\sqrt{DM}$

II-4 Interprétation de la carte obtenue et caractérisation spatiale des précipitations

Notre cartographie des isohyètes montre une variabilité spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle, caractérisée par une diminution des précipitations du nord vers le sud. Le gradient latitudinal et l'altitude, commandent pour une grande part cette distribution spatiale. Les zones pluviométriques ont donc une répartition en bandes longitudinales de valeurs décroissantes du Nord au Sud.

Ceci s'explique par l'affaiblissement des perturbations, vers le sud, en raison du dessèchement progressif des masses d'air chargées d'humidité. Par ailleurs, l'effet orographique de l'écran montagneux formé par, des monts du Titteri, la chaîne du Hodna et les monts de Belezma accentue les précipitations. Le gradient latitudinal et l'altitude, commandent donc pour une grande part cette distribution spatiale

Les précipitations varient de plus de 650 mm par an sur les sommets du les monts de Belezma au nord-est du bassin, à moins de 100 mm dans la zone présaharienne, en passant par une zone de 150-200 mm particulièrement développée en centre du bassin alentours du Chott.

La comparaison de cette carte avec celle établie par [Le Houerou et al,\(1975\)](#), montre une bonne concordance sur le plan géographique.

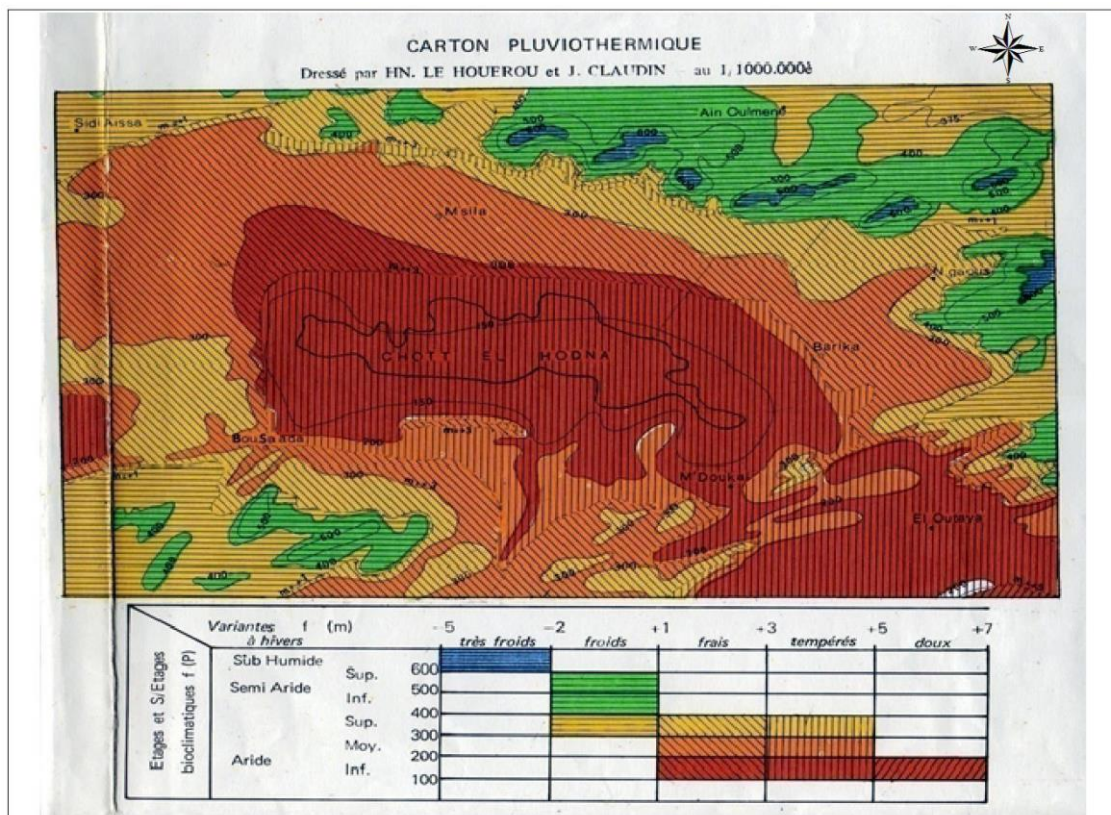
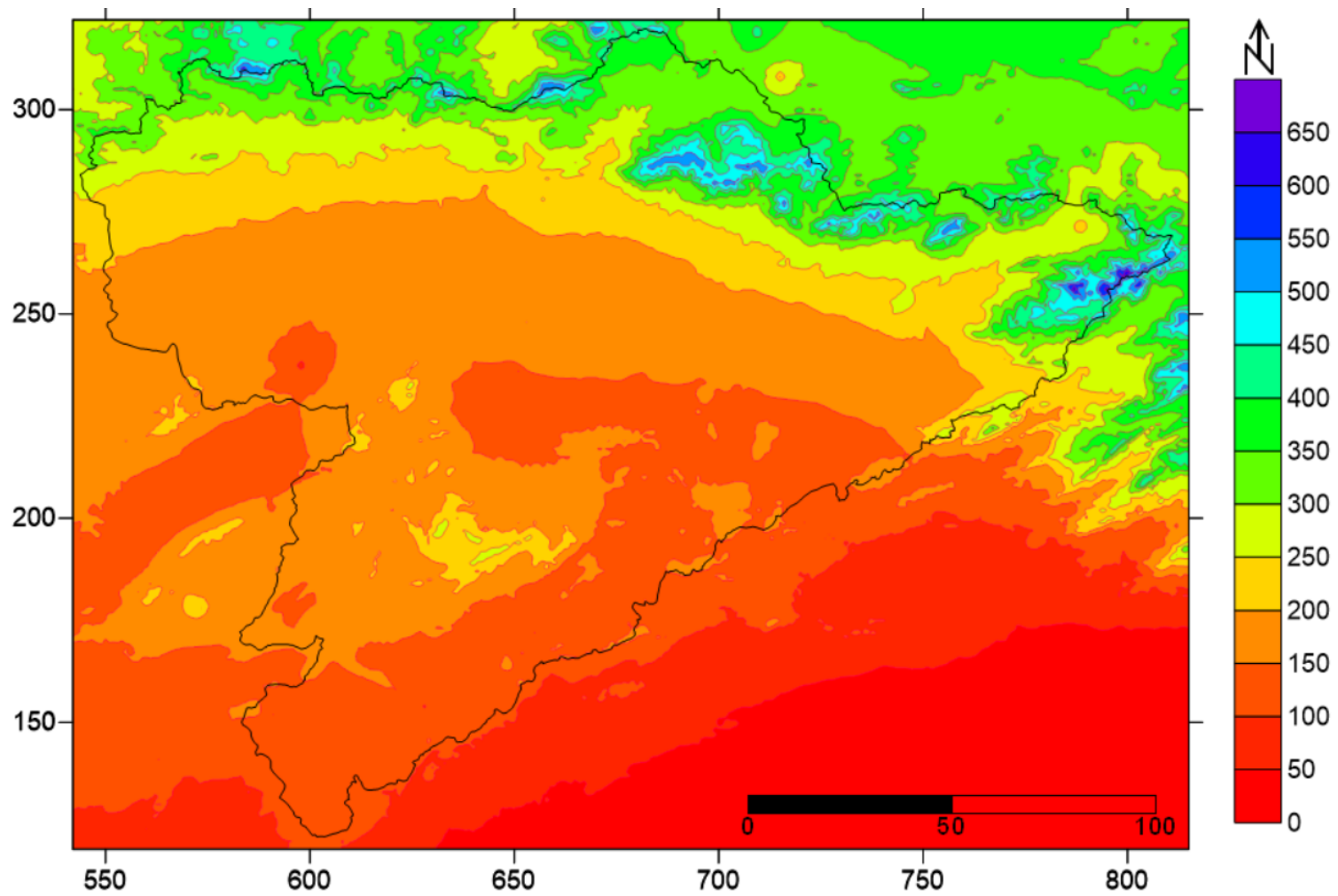


Figure II.27 : Carte pluviométrique du Hodna au 1/1.000.000^{ème} ([Le Houerou et al., 1975](#))



Méthode de Krigage (Approche stochastique)

$$\text{Equation (1) : } \sqrt{Pa} = -12,6 + 0,0666(Y) + 0,0113(Z_{\text{liess}}) + 3,32(Z_{\text{liess}}/X) + 0,49\sqrt{DM}$$

Figure II.28 : Carte des pluies annuelles moyennes du Hodna (1975 - 2017)

CONCLUSION

Conclusion

Dans notre étude, nous avons généré des cartes de distribution spatiale des pluies moyennes annuelles de la période (1975/2017) dans le bassin du Chott Hodna. Les facteurs géo-topographiques pris en considération sont ceux utilisés habituellement comme descripteurs de la distribution des précipitations en Algérie, ils englobent la position géographique (longitude et latitude), l'altitude et l'éloignement à la mer.

La spatialisation a été obtenue à travers la construction des modèles statistiques permettant d'estimer la pluie moyenne annuelle en fonction de ces facteurs.

Les résultats obtenus permettent d'observer la différence de représentativité et des méthodes d'interpolation. Ils permettent donc de démontrer que ces méthodes présentent des performances différentes entre elles et qu'il est préférable de faire différents tests avant de sélectionner l'une ou l'autre, en particulier si les terrains analysés présentent des variations physio-géographiques importantes.

L'analyse comparative des méthodes d'interpolation retenues dans cette étude, montre que les estimations livrées par ces modèles présentent des différences significatives selon les techniques utilisées.

La méthode déterministe de régression polynomiale et celle de la moyenne mobile sont les moins efficaces avec une erreur quadratique moyenne respective de 49,24 mm et de 75,27mm pour la première variante de régression (équation 1) et de 47,87 mm et de 76,23 mm pour la deuxième variante de régression (équation 2).

A l'inverse, le krigeage (méthode stochastique) est la méthode qui permet la spatialisation la plus précise (7,12mm et 9,39 mm pour les deux variantes 1 et 2 respectivement) et la plus représentative.

Les autres méthodes permettent d'obtenir des estimations d'une qualité très proche avec une erreur quadratique moyenne variant de 20,93 à 23,79 mm (équation 1) et de 22,94 à 25,66 mm (équation 1).

En somme la méthode stochastique de krigeage (équation de régression 1), précise (7,12 mm) car bien adaptée aux caractéristiques physio-géographiques du Hodna, est favorisée dans cette étude, pour présenter spatialement la pluie moyenne annuelle de ce bassin pour la période (1975-2017).

La carte élaborée est d'une grande importance pour mener des études sur l'hydrologie, la mobilisation et la gestion des ressources hydriques du bassin, comme elle peut être utilisée pour évaluer l'impact des changements climatiques sur ces ressources.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Baillargeon S, (2005) : Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations de Maître ès sciences, Université Laval, France, 137p.

Bencherit N, (2017) : Cartographie de l'érosion hydrique dans le grand bassin versant du hodna, Mémoire de master en hydraulique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 7p.

Bosser P, (2012): Interpolation spatiale. Ecoles nationale française des sciences géographiques, 55p.

Bourgine B, (1996) : Potentiel d'application de la géostatistique en géoingénierie, Document public, BRGM, 70 p.

Chini Z. L, (2009) : Pollution de l'environnement aquatique cas de la région d'El Hadjar, Mémoire de Magister en Chimie Analytique, Université Badji Mokhtar-Annaba, 109p.

Despagne W, (2006) : Méthodes géostatistiques pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. Mémoire de Master à l'Université de Bretagne Sud, Institut Universitaire Professionnalisé Informatique et Statistique (France).68p.

Diallo S.C, (2008) : Cartographie des caractéristiques physiques et chimiques des nappes d'eau souterraine du sud-ouest du Burkina Faso, Mémoire d'ingénieur de l'équipement rural ; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Burkina Faso, 79 p.

Gausse H., (1948) : Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913-47), échelle 1/ 500 000 (4 feuilles), I.G.N., Paris.

Ghallab A., (2015) : Modélisation de la distribution spatiale des paramètres bioclimatiques dans la région Tanger-Tetouan (rif occidental). EuropeanScientificJournal : 11/17, p 268-282.

Guidoum A., (2017) : Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien : Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines constantinoises et Chott Melghir (Coupe Nord-sud). Thèse de Doctorat en sciences en Hydraulique, Université Mohamed Khider – Biskra, 368 p.

Hammou KH, (2014) : Contribution à l'étude de la Biodiversité des Lombriciens dans la région d'El Hodna (Algérie). Mémoire de master en protection et conservation des écosystèmes, Université Constantine, 13p.

Ineglizs, (2002) : Contribution à l'étude de la répartition spatiale de la précipitation dans la région centre de l'Algérie du Nord. Thèse de maîtrise en aménagement hydraulique. École Nationale Supérieure de l'Hydraulique. Blida, Algérie. 120 p.

Jedidi et al, (2009) : Identification de zones pluviométriques homogènes d'un bassin versant à partir de l'information topographique. *Revue des sciences de l'eau* , 22/ 3 : 383-395.

Krige D, (1951) : A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*, 52:119- 139.

Kebiche M, (1994) : Le bassin versant du Hodna (Algérie): Ressources en eau et possibilités d'aménagement, In: *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, n°85-86, 1994. *Etudes algériennes*, sous la direction d'Alain Marre, 26p.

Kurtzman D, Kadmo, R, (1999) : Mapping of Temperature Variables. A Comparaison of Different Interpolation Methods, *Climate Research*, 13: 33-43.

Laborde J.-P., Mouhous M., (1998): Hydrolab Software, V.98.2. Équipe Gestion et valorisation de l'environnement de l'UMR 5651, « Espace » du CNRS.

Laborde J P (2000) : Hydrologie de surface, Cours Université de Nice-Sophia Antipolis, 191p.

Laborde J P (2004) : Exemple de cartographie d'une variable continue connue de façon discrète mais également liée à des champs de variables connues de façon continue : cas de la cartographie des pluies médianes de décembre sur l'Algérie du nord. *Journées de climatologie*, CNFG, Nancy, France : 13-30.

Le Houerou H. N., Claudin J. et Haywood N., Donadieu J., (1975) : Etude des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricoles dans la région du Hodna, Algérie. Vol 1, PNUD-FAO,. Rome, 154 p + 2 cartes.

Louamri A. (2013). Le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux. Thèse de doctorat en sciences (Géographie et Aménagement du Territoire, option : Hydrologie). Université de Constantine 1, 315 p.

Matheron G, (1963b) : *Traité de géostatistique appliquée, II : Le Krigeage*. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.24. Editions B. R. G. M., Paris.

Matheron G, (1965) : *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*, Paris : Masson, 1965, 306p.

Mebarki A. (2003) : *Cartographie automatique des précipitations : application à l'est algérien*. *Sciences & Technologie B* : 20, p 100-107.

Meylan P (1986) : Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage : Application à la pluviométrie. *hydrol. continent.*,1 : 25-34.

Minitab, (2019) : *Régression multiple. Assistant MINITAB - LIVRE BLANC*, 16p. Accédé le 08 juin 2019.

https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/Assistant_R%C3%A9gression_multiple.pdf

Rémériéras G. (1965) : L'hydrologie de l'ingénieur, 2ième édition, Eyrolles, Paris 456 p.

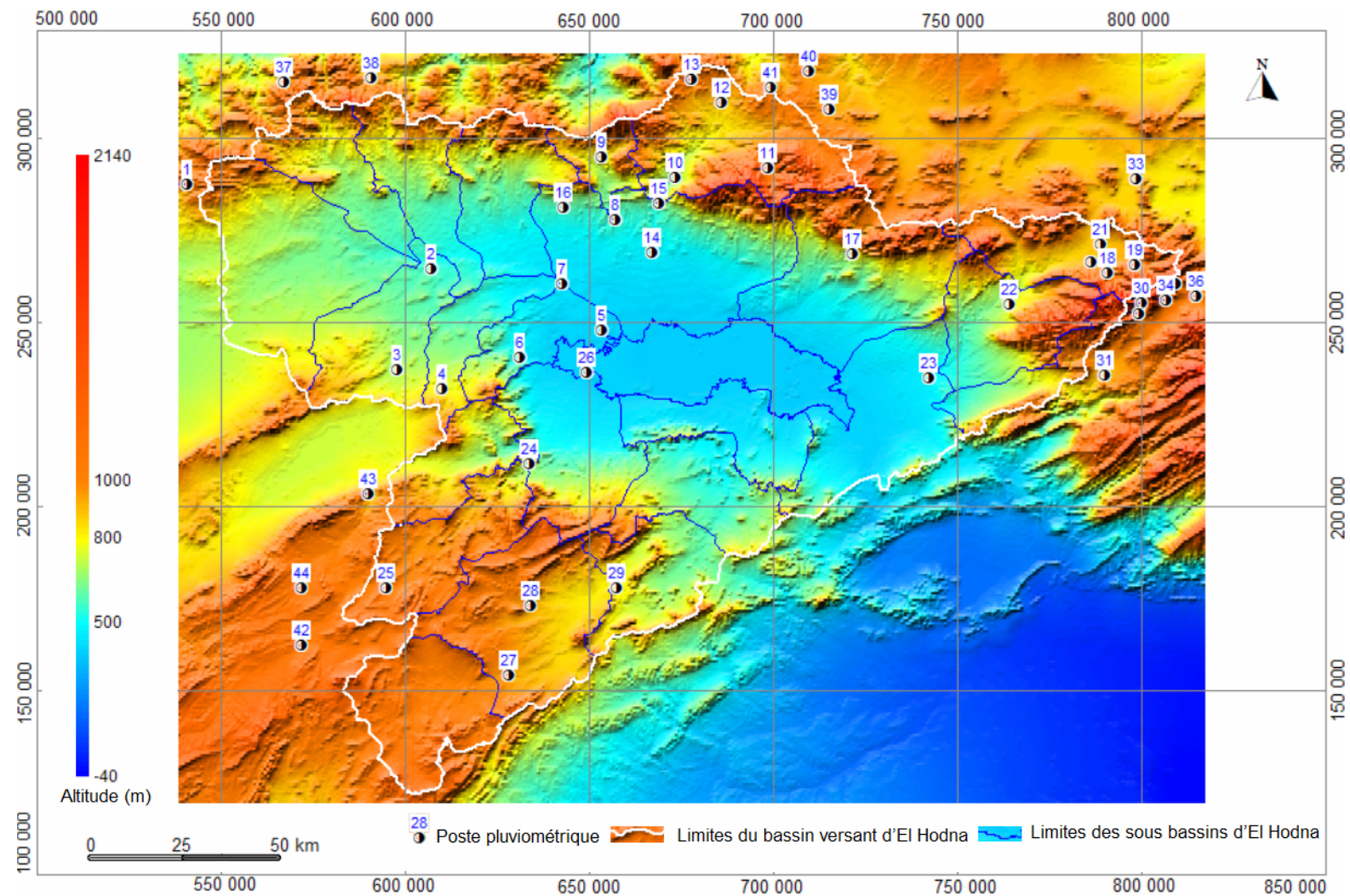
Seltzer P, (1946) : Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel, 219 p.

Zedam A, (2015) : Etude de la flore endémique de la zone humide de Chott El Hodna : Inventaire- Préservation. Thèse de Doctorat en sciences en biologie végétale, Université Ferhat Abbas Sétif I, Algérie, 197 p.

Annexes

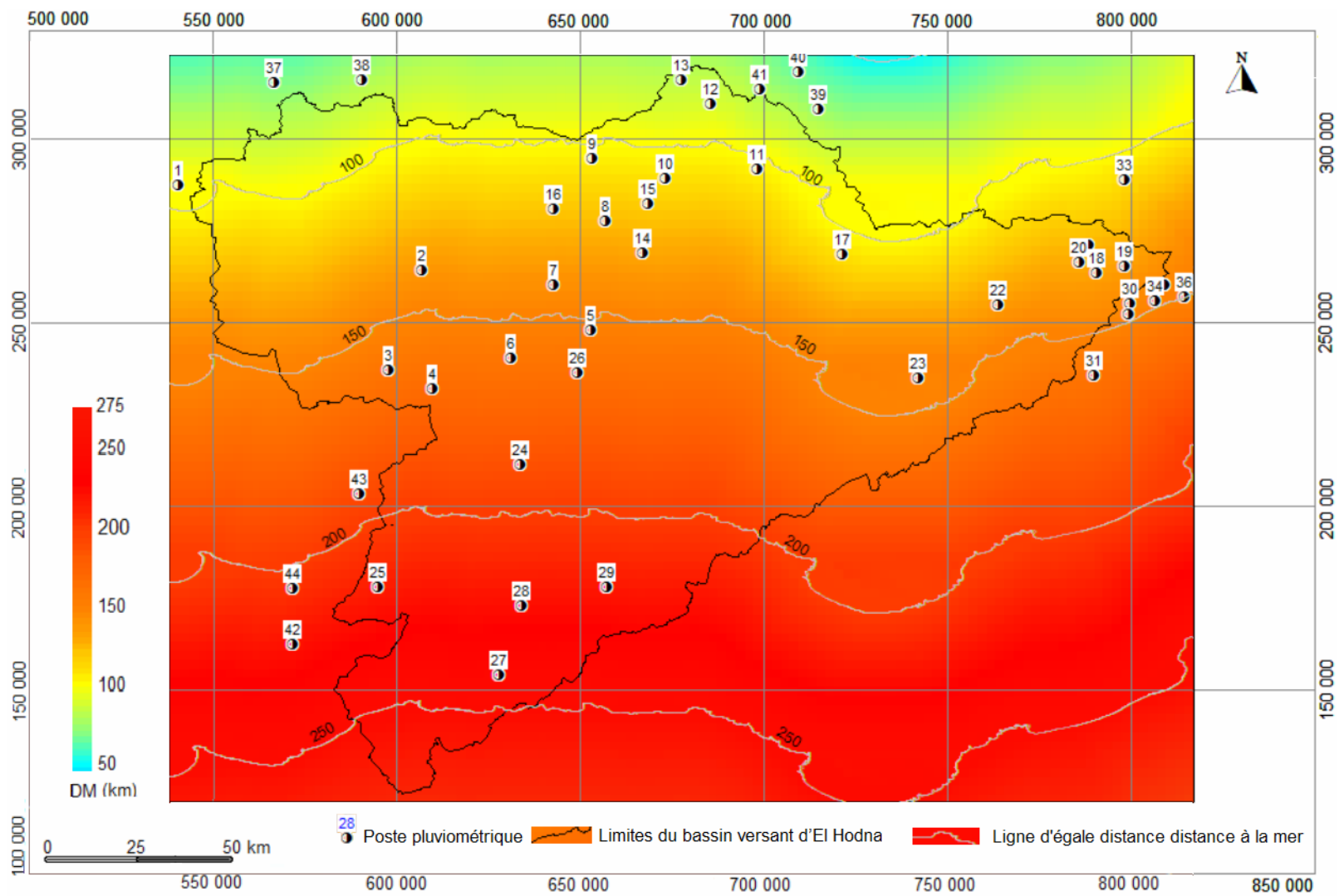
Annexe I

Position des 44 stations pluviométrique et MNT couvrant le bassin d'étude



Annexe II

Distance à la mer



Annexe III

Répartition saisonnière des pluies dans les stations retenues dans l'étude

Station	n°	Code	Automne	Hiver	Printemps	Eté	total annuel
A. EL HADJEL	2	50302	25,8	27,0	31,1	16,2	160,7
BEL AROUG	3	50303	22,2	27,8	36,3	13,7	95,5
SIDI AMEUR	4	50601	34,4	30,6	26,3	8,7	174,7
CHELLAL	5	50701	32,0	23,3	31,4	13,2	192,2
A. KHERMANE	6	50702	31,0	24,5	30,5	13,9	172,9
ROCADE SUD	7	50703	31,8	27,1	30,3	10,8	168,2
EL HAOURANE	9	50802	28,1	33,3	30,3	8,4	267,8
MEDJEZ	10	50901	32,8	26,0	31,4	9,9	224,8
BORDJ GHDIR	11	50904	28,2	29,9	32,8	9,1	386,6
B ARRERIDJ DEMRH	12	50905	26,7	29,2	32,9	11,3	361,0
MEDJANA	13	50906	27,4	35,3	29,3	8,0	399,4
MSILA SAR	14	51002	34,7	24,8	30,2	10,4	205,9
KSOB BARGE	15	51005	29,2	26,0	34,8	10,0	220,7
TARMOUNT	16	51009	33,9	25,4	31,7	9,0	213,8
SIDI OUADAH	17	51111	30,5	30,9	31,2	7,5	302,1
MEROUANA	18	51201	27,1	29,9	35,0	8,0	337,1
OUED EL MA	19	51203	25,9	30,0	35,6	8,5	339,1
CHERFA EL AIN	20	51206	28,9	30,5	31,2	9,4	278,0
HAOUARA DJ.	21	51207	27,6	34,8	30,6	7,0	237,2
NGAOUS	22	51306	34,7	26,0	31,5	7,9	224,2
BARIKA	23	51501	33,0	34,6	24,7	7,7	178,0
MOULIN FERRERO	24	51701	39,5	25,8	27,5	7,2	191,7
SLIM	25	51703	32,4	24,1	32,2	11,3	143,6
BANIOU	26	51801	34,0	24,3	29,8	11,9	153,8
AIN RICH	27	52002	42,4	16,9	23,5	17,2	101,4
AIN EL MELH	28	52003	39,1	21,2	24,9	14,8	153,9
BORDJ L AGHA	29	52102	41,0	22,6	24,7	11,6	123,4
AIN TOUTA	31	61203	33,7	26,7	26,3	13,3	243,0
OUED CHELIH	32	61211	30,3	29,9	29,2	10,5	318,9
AIN DJASSER	33	70201	28,5	27,1	33,0	11,4	277,5
HAMLA	34	70308	28,7	32,2	30,3	8,8	319,9
SEGUENE	35	70309	28,1	29,6	31,9	10,4	469,5
BATNA FERME EXP.	36	70316	29,3	26,6	31,4	12,6	376,2
DJOUAB	37	90301	25,6	37,8	30,0	6,7	295,1
S, EL GHOZLANE	38	150101	25,4	38,6	29,6	6,4	457,0
TIXTER	39	150614	28,3	25,1	35,8	10,8	235,2
BIR KASDALI	40	150707	24,2	30,4	34,6	10,8	389,3
SIDI EMBAREK	41	150801	27,2	31,1	33,2	8,5	313,2
AIN MOUILLAH	42	170401	28,3	26,4	31,9	13,5	104,4
MEDJEDEL	43	170501	28,9	26,8	32,7	11,5	141,6
DAR CHIOUKH	44	170503	26,6	26,6	31,3	15,5	228,1
MOYENNE			30,4	28,2	30,8	10,6	

عنوان المذكرة : : دراسة مقارنة بين طرق الاستيفاء المكاني لرسم خرائط التساقطات المطرية: التطبيق على الحوض التجميعي شط الحضنة المياه (شمال الجزائر).

المؤطر: قيدوم عزالدين

الإسم: كالتوم

اللقب: غفافلالية

ملخص : عادة ما تكون الخريطة ذات الخطوط متساوية القيمة المطرية هي النتيجة المرئية لعملية الاستيفاء المكاني وفي الواقع عملنا هذا يتعلق برسم خريطة متوسط هطول الأمطار السنوي الخاصة بحوض شط الحضنة الواقع في وسط شمال الجزائر للفترة الممتدة بين 1975 و2017 . التقنية المعتمدة في هذه الدراسة هي النمذجة الإحصائية التي مكنتنا من تقدير هذا العامل المناخي وفقا للمتغيرات الجغرافية والطبوغرافية لحوض الدراسة. لأجل هذا قمنا بتطبيق طريقة الارتداد أو الارتجاع المتعدد، كما تم التأكد من صحة النتائج والمصادقة عليها باستخدام ومقارنة نماذج الاستيفاء المختلفة. اعتمادا على نتائج التحقق والمصادقة المتحصل عليها، وقع اختيارنا على تقنية كريجنج الاحتمالية لتمثيل التوزيع الجغرافي لكمية الأمطار المتوسطة لحوض الحضنة، الدقة الإجمالية المعبر عنها بواسطة قيمة الخطأ التريبيعي المتوسط هي 7,12 ملم.

الكلمات المفتاحية: الجزائر، الحوض التجميعي، رسم الخرائط، شط الحضنة، الاستيفاء المكاني، المطر الجزائر.

Memory title : Comparative study between spatial interpolation methods for precipitation mapping: Application to a watershed of northern Algeria

Name: Ghefaflia

First name: Kaltoum

Directed by: Guidoum Azeddine

Abstract: A map with isolines is usually the visual outcome of the process of spatial interpolation. Indeed, the present work concerns a mapping of average annual rainfall in the Chott Hodna basin located in the center of northern Algeria for the period 1975-2017. The technique adopted is the statistical modeling that allowed us to estimate the so-called climatic factor according to the geo-topographic variables. The multiple regression method was applied and the results were interpolated using and comparing different interpolation models. At the end of the validation results, the stochastic Kriging technique was chosen to represent the spatial distribution of the Hodna mean rain. The overall accuracy given by the value of the mean squared error is 7.12 mm.

Key words: Algeria, watershed, cartography, Chott Hodna, spatial interpolation, rain.

Titre du mémoire : Étude comparative entre les méthodes d'interpolation spatiale pour la cartographie des précipitations : Application à un bassin-versant de l'Algérie du Nord.

Nom: Ghefaflia

Prénom: Kaltoum

Encadreur: Guidoum Azeddine

Résumé : Une carte présentant des isolignes est généralement l'aboutissement visuel du processus de l'interpolation spatiale. En effet, le présent travail porte sur une cartographie des pluies moyennes annuelles dans le bassin de Chott Hodna situé au centre de l'Algérie septentrionale pour la période 1975-2017. La technique adoptée est la modélisation statistique qui nous a permis d'estimer le dit facteur climatique en fonction des variables géo-topographiques. La méthode de régression multiple a été appliquée et les résultats ont été interpolés en utilisant et en comparant différents modèles d'interpolation. A l'issue des résultats de la validation, la technique stochastique dite Krigeage a été retenue pour représenter la distribution spatiale de la pluie moyenne du Hodna. La précision globale donnée par la valeur de l'erreur quadratique moyenne est de 7,12 mm.

Mots clés : Algérie, bassin versant, cartographie, Chott Hodna, interpolation spatiale, pluie.

Le résumé doit être rédigé en deux langues différentes au moins