

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

**Cartographie des pluies annuelles appliquée au bassin des  
issers.**

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0031-17

APA Citation (توثيق APA):

**Mansouri, Samia (2017). Cartographie des pluies annuelles appliquée au bassin des  
issers[Thèse de master, ENSH].**

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بثمين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



Département Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**OPTION** : Alimentation en eau potable

**THEME** :

Cartographie des pluies annuelles appliquée au bassin des  
Issers

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup> : MANSOURI Samia

**DEVANT LES MEMBRES DU JURY**

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M <sup>r</sup> SALAH Boualem	Professeur	Président
M <sup>eme</sup> MOKRANE Wahiba	M.A.A	Examinatrice
M <sup>r</sup> HACHEMI Abdelkader	M.A.A	Examineur
M <sup>eme</sup> TAFAT Leila	M.A.A	Examinatrice
M <sup>r</sup> BENKACI Ali Tarik	M.A.A	Promoteur

Mars 2017

# *Remerciements*

*Au terme de ce projet, fruit de mes années de labeur, je tiens à remercier sincèrement Dieu, de m'avoir octroyé les moyens et les personnes qui m'ont aidé dans son élaboration*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à :*

*Mon promoteur M<sup>r</sup> BENKACI.T de m'avoir orienté et pour ces conseils judicieux, ses riches enseignements et sa constante disponibilité dans le but de mener à bien ce master.*

*Toute la gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de la formation master, et nos respects aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

*Mon dernier remerciement, mais non le moindre s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*S. Mansouri*

# *Dédicace*

*Je tiens avant tout à remercier le dieu tout puissant qui m'a donné beaucoup de courage et de volonté pour que je puisse arriver à finir ce modeste travail.*

*Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé*

*tout au long de mon travail, particulièrement à :*

*Mes chers parents pour les encouragements qu'ils ont manifestés tout au long de mon parcours.*

*Mon promoteur Mr T.BENKACI pour son encadrement et ses orientations judicieuses qui nous ont été infiniment utiles.*

*A mes frères Ferhat, Massi et Mohamed A mes sœurs Kahina et Dalila.*

*A la mémoire des étudiants martyrs de l'EPST Tlemcen.*

*A mes chères amies Lydia ,Ouiza, Nadjla ;Fatima et Souad .*

*A mon très cher ami Hichem*

*A tous ceux qui m'ont apporté de l'aide, de près ou de loin.*

*S. Mansouri*

## ملخص

الجزائر هي منطقة واسعة، والتي تتميز بارتفاع تقلبات هطول الأمطار الملحوظة خاصة في العقود الأخيرة. من ناحية، فهي تتميز بالتباين الشديد في الفضاء، من ناحية أخرى، كذلك تتميز بالتباين الشديد عبر الزمن، سواء على المستوى السنوي من النطاق الساعي. في هذه الحالة، فإن رسم خرائط الأمطار يصبح ضروريا إن لم تكن المناطق مجهزة بمحطات الأرصاد الجوية من أجل تحسين إدارة الموارد المائية. والغرض من هذا العمل هو لتصميم خريطة هطول الأمطار السنوي لحوض المياه يسير مع الأخذ بعين الاعتبار بالخصائص الهيدرولوجية للحوض المحدد.

## Résumé

L'Algérie est une vaste région, marquée par une forte variabilité des précipitations marquée en particulier ces dernières décennies. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace, d'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à l'échelle horaire.

Dans ce cas, la cartographie des pluies devient indispensable dans les zones non pourvues de stations climatologiques pour une meilleure gestion des ressources en eau.

Le but de ce travail est d'établir une cartographie des pluies annuelles du bassin versant de l'Isser en tenant compte des spécificités hydrologiques de ce bassin.

## Abstract

Algeria is a vast region marked by a strong variability of precipitation particularly in recent decades. On the one hand, they are characterized by a great variability in space, and on the other hand, they are characterized by a great variability in time, both on the annual scale and the hourly scale. In this case, the mapping of rainfall becomes necessary in the case of zones without climate stations for better management of water resources.

The purpose of this work is to compile a map of the annual rainfall of the Isser watershed taking into account the hydrological specifications of the basin.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Les précipitations à l'échelle du bassin versant</b>	
Introduction.....	2
I.1 Notion du bassin versant.....	2
I.2 Le cycle hydrologique de l'eau.....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 L'évaporation.....	4
I.2.3 L'interception et le stockage dans les dépressions.....	5
I.2.4 L'infiltration et la percolation.....	5
I.2.5 Les écoulements.....	5
I.2.6 Les précipitations.....	6
I.3 La mesure des précipitations.....	6
I.3.1 Contraintes de mesure des précipitations.....	7
I.3.2 Variabilité spatio-temporelle des précipitations.....	7
I.3.2.1 Variabilité temporelle des précipitations.....	8
I.3.2.1.1 Problématique la stationnarité.....	8
I.3.2.1.2 Les régimes pluviométriques et les cycles de sécheresse.....	9
I.3.2.2 Variabilité spatiale des précipitations.....	10
I.3.3 Influence de la variabilité des pluies sur les régimes des cours d'eau.....	11
I.4 Nécessite de la cartographie des pluies.....	11
I.4.1 Objectif de la cartographie des pluies.....	11
I.5 Application de la cartographie dans la gestion des ressources en eau.....	12
I.5.1 Cas des pluies.....	12
I.5.2 Cartographie des ressources en eau souterraines.....	12
I.5.3 Cas de la protection contre les crues.....	13
I.5.3.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation.....	14
I.5.4 Cas de l'agriculture .....	14
I.5.4.1 Une méthode de cartographie de la salinité des sols.....	14
I.5.5 Problème de désertification.....	14
I.6 Apport des SIG dans le domaine de gestion des ressources en eau.....	15
I.7 Conclusion.....	16
<b>Chapitre II : Les méthodes de cartographie des pluies</b>	
Introduction.....	17
II.1. Définition de la cartographie.....	17
II.2. Cartographie numérique et/ou automatique.....	17
II.2.1 Objectif de la cartographie : l'interpolation spatiale.....	17
II.2.2 Les triangulations.....	19
II.2.3 Polygones de Thiessen.....	19
II.2.3 Méthode des isohyètes (isovaleurs).....	20
II.2.5 Méthodes barycentriques.....	21
II.2.6 Les tendances.....	21

II.2.7 Les fonctions Spline.....	22
II.2.8 Méthodes d'interpolation basée sur l'intelligence artificielle.....	22
II.2.9 Méthodes géostatistiques.....	23
II.2.10 Cartographie satellitaire.....	23
II.2.10.1 La télédétection.....	23
II.2.10.2 Le radar.....	24
II.3 La géostatistique : Approche théorique.....	25
II.3.1 Le krigeage : définition et concepts de base.....	25
II.3.1.1 Le variogramme.....	27
II.4 Conclusion.....	30

### **Chapitre III : Cartographie des pluies annuelles du bassin de l'Isser**

Introduction.....	31
III.1 Présentation de la région d'étude.....	31
III.1.1 Situation Géographique.....	31
III.1.2 Géologie-Géomorphologie .....	32
III.1.2.1 Lithologie.....	32
III.3 Topographie du bassin.....	33
III.4 Climatologie.....	33
III.4.1 Pluies Mensuelles.....	33
III.4.2 Les températures.....	34
III.5 Caractéristiques Hydrologiques du bassin de l'Isser.....	34
III.6 Etude de la pluviométrie.....	35
III.6.1 Situation géographique des stations pluviométriques.....	35
III.6.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss ou loi normale.....	36
III.6.3 Estimation de la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin de l'Isser.....	38
III.6.4 Caractérisation des transports solides de la zone d'étude.....	39
III.7 Données et Méthodologie.....	40
III.7.1 Constitution de l'échantillon de données.....	40
III.7.2 Présentation du logiciel de cartographie.....	41
III.7.3 Résultats de la cartographie des pluies.....	44
III.7.3.1 Validation des résultats .....	45
III.7.3.2 Comparaison entre les trois modèles de simulation choisis .....	45
III.8 Conclusion.....	47
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>48</b>

## Liste des tableaux :

### Chapitre I : Les précipitations à l'échelle du bassin versant

<b>Tableau I.1</b> : Régimes pluviométriques du monde (Tiré de Champoux, Toutant, 1988) .....	10
---	----

### Chapitre III : Cartographie des pluies annuelles du bassin de l'Isser

<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques géographiques de la station de Chabet el Aneur.....	33
<b>Tableau III.2</b> : les pluies moyennes mensuelles à la station de Chabet El Aneur	34
<b>Tableau III.3</b> : Répartition des températures moyennes interannuelles (station de Chabet El Aneur).....	34
<b>Tableau III.4</b> : caractéristiques hydromorphométrique du bassin d'Isser.....	35
<b>Tableau III.5</b> : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	36
<b>Tableau III.6</b> : Quantiles des pluies annuelles (loi Normale).....	37
<b>Tableau III.7</b> : Pluie moyenne du bassin d'Isser par la méthode de Thiessen.....	39
<b>Tableau III.8</b> : Calcul du transport solide (Tonnes/km <sup>2</sup> /an).....	40
<b>Tableau III.9</b> : Echantillon de pluies annuelles de l'Isser.....	41
<b>Tableau III.10</b> : comparaison d'erreur des models.....	46



## Liste des figures :

### Chapitre I : Les précipitations à l'échelle du bassin versant

Figure I.1 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche, 1963).....	3
Figure I.2 : Le cycle de l'eau (John ; Evans, Howard Perlman, 2016).....	4
Figure I.3 : Cartographie des ressources en eau souterraines du Sud Algérien.....	13

### Chapitre II : Les méthodes de cartographie des pluies

Figure II.1 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : sites d'observation.....	18
Figure II.2 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : représentation splines.....	18
Figure II.3 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : perspectives.....	18
Figure II.4 : Exemple d'application de la méthode de Thiessen.....	20
Figure II.6 : Type de modèles d'ajustement des variogramme.....	29

### Chapitre III : Cartographie des pluies annuelles du bassin de l'Isser

Figure III.1 : Carte de situation générale du bassin.....	32
Figure III.2: Localisation des stations pluviométriques Isser.....	36
Figure III.3 : Ajustement des pluies annuelles à la loi normale.....	37
Figure III.4 : Polygone de Thiessen (Bassin d'Isser).....	38
Figure III.5 : Fenêtre principale du logiciel .....	42
Figure III.6 : Fenêtre des données.....	43
Figure III.7 : Utilisation du Variogramme .....	43
Figure III.8 : Visualisation .....	44
Figure III.9 : Exemple de modèles utilisés : (a) : Exponentiel, (b) : Gaussien.....	44
Figure III.10 : Erreur de simulation des pluies par les différentes modèles : (a) exponentiel et (b) Gaussien.....	44
Figure III.11 : Cartographie des pluies annuelles de l'Isser .....	45
Figure III.12 : Carte d'erreurs de simulation des pluies.....	46

# Introduction générale

L'irrégularité qui singularise les régimes hydrologiques alimentés par des précipitations annuelles dans les régions semi- arides, rend difficile la détermination quantitative des divers paramètres hydrologiques des bassins versants. Il est possible de mesurer en différents points les diverses composantes du bilan hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leur variabilité spatiale s'avère très difficile.

Des outils modernes (méthodes d'analyse des données, de géostatistique et de cartographie automatique) sont mis en œuvre pour une connaissance spatiale rigoureuse de la pluie. D'où l'intérêt de la discrétisation spatiale des bassins.

La valorisation de l'information disponible est obtenue par régression pluies-relief et interpolation spatiale des résidus (part des précipitations non expliquée par les paramètres géo-topographiques).

L'intérêt de la cartographie des pluies par différentes méthodes a fait l'objet d'une recherche approfondie par plusieurs hydrologues, puisque la connaissance de la pluie est la première information de tout aménagement.

C'est dans ce cadre qu'on a proposé ce sujet ou on fait en premier lieu une analyse théorique sur les méthodes d'interpolation spatiale des pluies.

En deuxième partie du mémoire, une application de la cartographie des pluies sur le bassin versant de l'Isser a été effectuée par le logiciel Easykrig sous matlab en testant différents variogrammes.

Ce mémoire a donc pour objet principal : La réalisation d'une cartographie des pluies annuelles dans bassin versant de l'Isser.

## **Chapitre I : Les précipitations à l'échelle du bassin versant**

### **Introduction**

L'hydrologie est la science de l'eau, de ses propriétés, de ses phénomènes et de sa distribution. Cependant, pour des raisons pratiques, le mot « hydrologie », tel qu'utilisé par les scientifiques et les ingénieurs, sera restreint dans son sens par l'exclusion de certains de ses aspects.

L'hydrologie est la science qui traite des eaux de la terre de leurs occurrences, circulation et distribution, de leurs propriétés chimiques et physiques, ainsi que de leurs réactions avec l'environnement, incluant leurs relations avec les êtres vivants. (**Chow, 1964**).

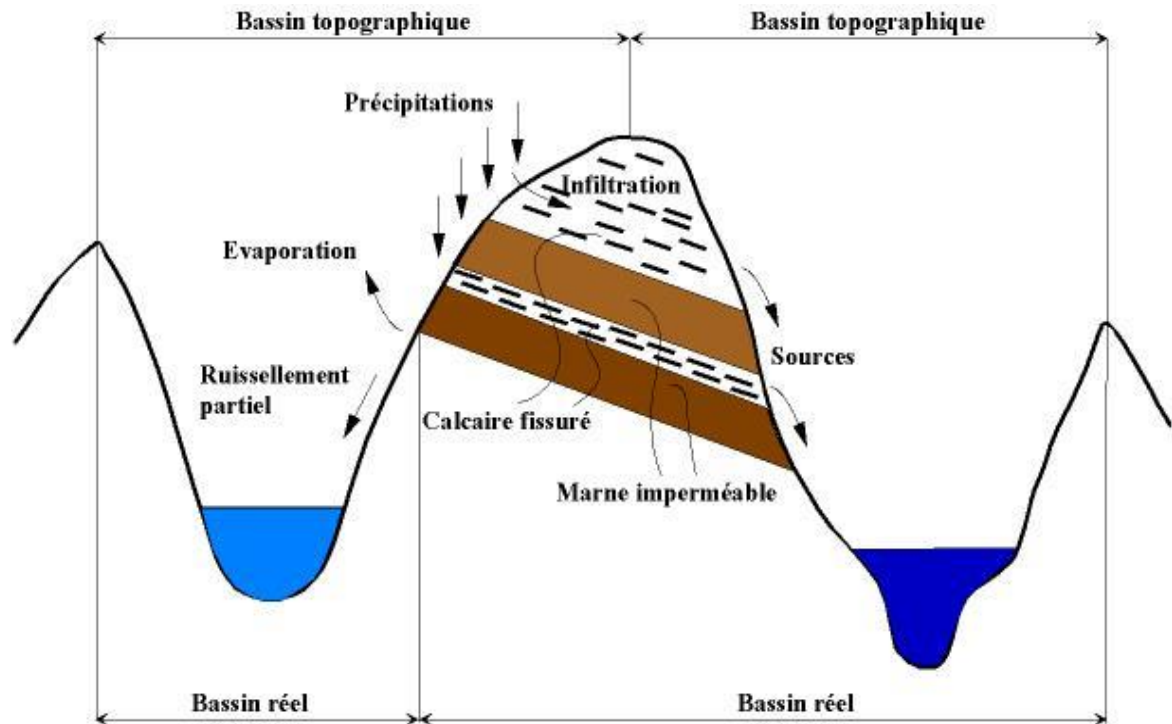
### **I.1 Notion du bassin versant**

Un bassin versant ou bassin hydrologique, est l'unité ou cadre de toute étude hydrologique. C'est un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les précipitations, et dont les excès en canaux ou en matières solides transportés par l'eau forment, en un point unique dans l'espace, une embouchure ou un exutoire (**Roche, 1971**). Les limites d'un bassin sont formées par les lignes de partage des eaux qui le séparent des bassins adjacents.

Le bassin versant transforme la pluie en débit de rivière. Cette transformation est :

- Non linéaire
- Varie pour un même bassin versant au cours de l'année, d'une saison à l'autre, d'une crue à l'autre.
- Varie d'un bassin versant à un autre selon les conditions géologique, pédologique, climatique et selon l'occupation du sol. (**Legout, 2016**).

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (voir Fig. I.1). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie.



**Figure I.1 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche, 1963).**

## I.2 Le cycle hydrologique de l'eau

### I.2.1 Définition

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années. (Laborde, 2009).

Le cycle de l'eau n'a pas de point de départ, mais les océans semblent un bon point de départ. Le soleil réchauffe l'eau des océans ; celle-ci s'évapore dans l'air. Les courants d'air ascendants entraînent la vapeur dans l'atmosphère, où les températures plus basses provoquent la condensation de la vapeur en nuages. Les courants d'air entraînent les nuages autour de la terre, les particules de nuage se heurtent, s'amoncellent et retombent en tant que précipitation. Certaines précipitations retombent sous forme de neige et peuvent s'accumuler en tant que calottes glaciales et glaciers.

Une grande partie des précipitations retournent aux océans ou s'infiltrent dans le sol. L'eau s'écoule aussi en surface. Certains écoulements retournent à la rivière et donc vers les océans. L'écoulement de surface et le suintement souterrain s'accumulent en tant qu'eau douce dans les lacs et rivières. Mais tous les ruissellements ne s'écoulent pas vers les rivières. Une grande partie s'infiltrate dans le sol, une partie de cette eau reste près de la surface du sol et peut retourner vers les masses d'eau de surface comme résurgence d'eau souterraine. Certaines nappes souterraines trouvent une ouverture dans le sol et émergent comme des sources d'eau douce. L'eau souterraine peu profonde est absorbée par les racines des plantes et rejetée dans l'atmosphère via la transpiration des feuilles. Une quantité des eaux infiltrées descend encore plus profondément et réalimente les aquifères, qui stockent d'énormes quantités d'eau douce pour de longues périodes.

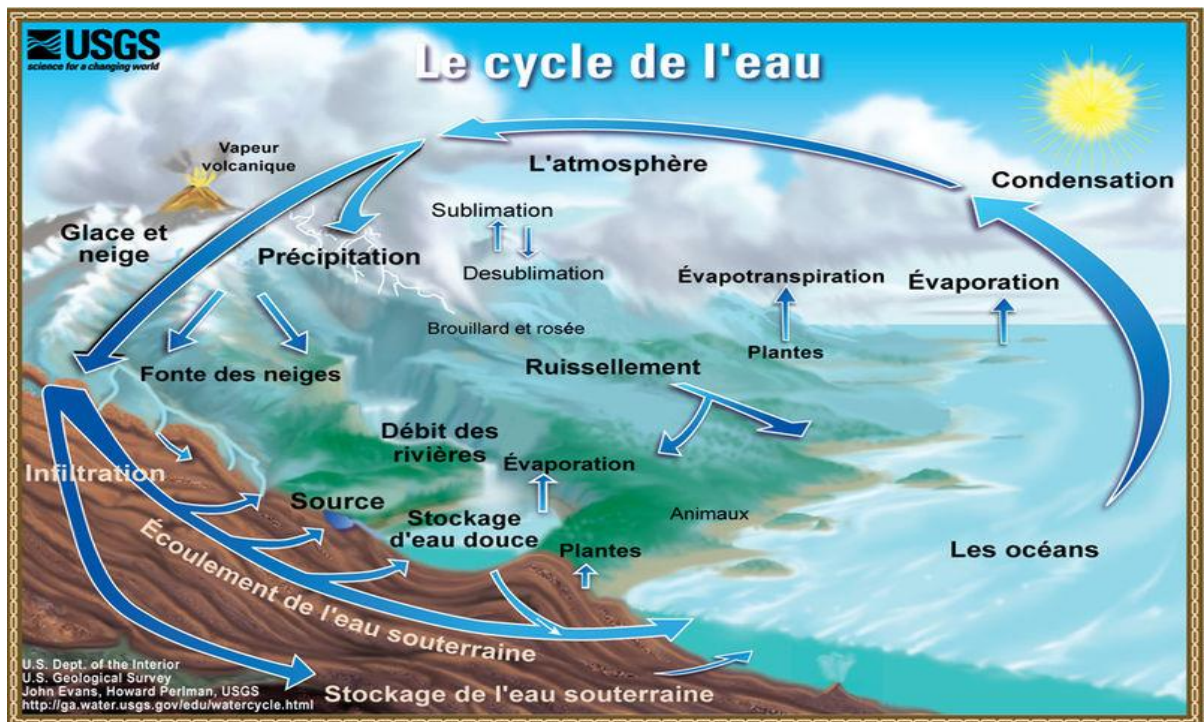


Figure I.2 : Le cycle de l'eau (John ; Evans, Howard Perlman, 2016)

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons :

### I.2.2 L'évaporation

L'évaporation se fait principalement au niveau des océans qui couvrent 70 % de la surface terrestre et contiennent 97 % des eaux disponibles.

L'évaporation annuelle moyenne à partir des océans est estimée à 1400 mm. Cependant, approximativement 90 % de ce volume retombe directement sous forme de précipitations sur les océans. Mais l'évaporation se fait aussi directement à partir de l'atmosphère en temps de pluie, au niveau des plans d'eau, du sol humide et à travers la végétation.

Dans ce dernier cas on l'appelle transpiration. On définit ce le nom l'évapotranspiration l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration. L'évaporation directe à partir d'un manteau nival, sans passer par l'état liquide, est appelée sublimation. (Bennis, 2007).

### **I.2.3 L'interception et le stockage dans les dépressions**

La pluie (ou dans certains cas la neige) peut être retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore. La partie n'atteignant jamais le sol forme l'interception. Son importance est difficile à évaluer et souvent marginale sous nos climats, donc souvent négligée dans la pratique. Le stockage dans les dépressions est, tout comme l'interception, souvent associé aux pertes. On définit l'eau de stockage comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse. (Musy, 2005).

### **I.2.4 L'infiltration et la percolation**

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltré par unité de temps (mm/h ou m<sup>3</sup>/s). La capacité d'infiltration est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données.

### **I.2.5 Les écoulements**

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On peut distinguer en premier lieu les écoulements rapides des écoulements souterrains plus lents. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en :

- **Écoulement de surface** (mouvement de l'eau sur la surface du sol).
- **Écoulement de subsurface** (mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol).
- **Écoulement souterrain** : désigne le mouvement de l'eau dans le sol (Ambroise, 1999).

### I.2.6 Les précipitations

Représentent les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) et/ou solide (neige, grésil, grêle) ainsi que les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,). Elles correspondent à différents mécanismes d'ascendance (formation des nuages) et présentent des caractéristiques d'intensité et de durée diverses. La pluie est un phénomène associé aux systèmes nuageux précipitant, qui dépend de la microphysique des nuages mais aussi des mouvements atmosphériques à grande échelle. **(Berne, 2002).**

Les précipitations sur les terres (800mm/an) proviennent à 40 % de l'évaporation à partir des océans et à 60 % à partir de l'évaporation au niveau des plans de l'atmosphère et du sol. **(Bennis, 2007).**

### I.3 La mesure des précipitations

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation. On exprime généralement les précipitations en hauteur ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale (mm). Si on rapporte cette hauteur d'eau à l'unité de temps, il s'agit d'une intensité (mm/h). La précision de la mesure est au mieux de l'ordre de 0,1mm **(Musy, 2005).**

L'enregistrement des pluies en général, et des averses en particulier, se fait au moyen de divers appareils de mesure. Les plus classiques sont les pluviomètres et les pluviographes, à enregistrement mécanographique ou digital. Au contraire de ces approches ponctuelles, il existe aussi des méthodes de mesures globales fondées sur les méthodes radar et la télédétection.

Citons toutefois les deux appareils de mesures fondamentaux que sont **(Roche.1963)** :

- **Le pluviomètre** : instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés.
- **Le pluviographe** : instrument captant la précipitation de la même manière que le pluviomètre mais avec un dispositif permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, leur répartition dans le temps, autrement dit les intensités.

---

---

### I.3.1 Contraintes de mesure des précipitations

Les principaux problèmes rencontrés pour la mesure des précipitations concernant (**Molinie, 2004**) :

1. Perturbation des mesures par la circulation atmosphérique : Les obstacles (végétation, construction, le pluviomètre lui-même, ...) à la circulation de l'air perturbent les trajectoires des précipitations lorsque le vent est violent. Par exemple, lors d'averses violentes, les mesures de pluies sont affectées par l'inclinaison globale des filets de pluie (angle d'incidence) et par les turbulences de l'atmosphère au voisinage de l'impluvium. Parfois, seule une faible proportion de l'eau tombant au sol est captée par le pluviomètre. En effet, il a été montré que l'angle d'incidence de la pluie est une fonction croissante de la vitesse et du caractère ascendant du vent. Par ailleurs, cet angle est d'autant plus important que le diamètre des gouttes de pluie est faible.
2. S'il on plaçait le pluviomètre au niveau du sol (enterré), le rebond des gouttes ou fragment de gouttes d'eau sur la modénature pouvant changer au cours de l'averse perturberait aussi la mesure. De plus sur une longue période de la croissance de la végétation pourrait porter atteinte à l'uniformité des conditions de mesures. La fragilité du système de mesure serait aussi accrue vu l'accessibilité des appareils pour les animaux par exemple.
3. Pour les systèmes à mesure totale des précipitations, il faut prendre garde à ce que le cumul de précipitation ne soit pas évaporé entre les mesures.
4. Nécessite d'enregistrer les données.
5. Choix de la localisation pour assurer la fiabilité, la reproductibilité, et une certaine homogénéité des mesures d'un point à l'autre.

Etant convaincu qu'une mauvaise mesure vaut mieux qu'un bon calcul, (**Roche, 1963**). C'est pour cela que les dernières recherches reposent sur la mesure des précipitations est donc la naissance de la cartographie ce dernier sera détaillé dans le chapitre suivant.

### I.3.2 Variabilité spatio-temporelle des précipitations

Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte. D'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.



### I.3.2.1 Variabilité temporelle des précipitations

Les précipitations n'ont cessé de fluctuer à toutes les échelles de temps. L'étude de variabilité des précipitations est importante pour toute étude hydrologique. Egalement, elle est d'un apport considérable dans l'étude des changements climatiques.

Le climat et plus exactement les précipitations ont connus des variations importantes ; un réchauffement et une baisse des précipitations sont observés depuis la moitié des années 1970 à l'échelle globale et à l'échelle régionale « méditerranée ». la circulation atmosphérique générale joue un rôle déterminant dans la variation du climat méditerranéen (notre zone d'étude) qui se trouve plus influence par l'oscillation nord atlantique (Taibi,2011).

Pour déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, peut être déterminé par un certain nombre de tests statistiques :

#### I.3.2.1.1 Problématique la stationnarité

Cette hypothèse revient à dire que les caractéristiques statistiques du processus que l'on étudie sont invariantes dans le temps ; Une série de données est dite stationnaire, lorsque l'on ne retrouve pas de variations temporelles significatives, autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement. On peut détecter une non-stationnarité en examinant la moyenne ou la variance de la série et en évaluant s'il y a eu un changement significatif à une date donnée.

Afin de tester la stationnarité de la moyenne d'une série de temps, on a le choix d'utiliser deux types de tests : les tests paramétriques et les tests non paramétriques. Les tests paramétriques sont effectués en considérant que la statistique du test est distribuée selon une fonction de distribution bien définie, comme par exemple, la loi de Student. Dans le cas des tests paramétriques faisant intervenir la distribution normale, la loi de Student et la loi de Fisher, on doit préalablement s'assurer que les données standardisées sont indépendamment et identiquement distribuées selon la loi normale centrée réduite ( $N(O, I)$ ).

Mais lorsque l'on rejette l'hypothèse de normalité de la série ou que l'on ne dispose pas de suffisamment de données pour vérifier cette hypothèse, ces tests ne peuvent être utilisés. On peut alors avoir recours à des tests non paramétriques, qui permettent de s'affranchir de l'hypothèse de normalité, en fondant l'analyse exclusivement sur les rangs des observations. L'avantage de ces tests est que l'on ne doit poser aucune hypothèse sur la distribution des données et que l'on peut très souvent effectuer quand même le test même avec un nombre limité de données.

## ➤ Indices pluviométriques

Les outils non statistiques, comme les indices pluviométriques, permettent d'étudier la variabilité climatique. Les indices les plus utilisés pour la caractérisation du régime pluviométrique et qui font l'objet de plusieurs études, notamment dans le suivi de la sécheresse sont :

### 1. Indice de sécheresse de Palmer (PDI)

Cet indice mesure la différence d'approvisionnement en humidité pour les phases sèches sautant que pour les phases humides. Il est calculé pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales. Étant donné que ces indicateurs sont normalisés, il est possible de comparer différentes régions.

### 2. Indice pluviométrique standardisé

L'indice pluviométrique est un outil très intéressant pour caractériser les années sèches et les années humides. Il met en évidence la répartition temporelle de ces années. L'indice standardisé de précipitation « SPI » (standardised precipitation index) a été développé en 1993 en vue de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée. Il reflète l'impact de sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Cet indice est calculé surtout lorsque la précipitation n'est pas normalement distribuée, notamment pour des périodes inférieures à 12 mois.

Le SPI fait ressortir deux périodes bien distinctes : une période excédentaire (1936,1975), suivie d'une période déficitaire (1976,2001), la décennie 1966-1976 apparaît la plus excédentaire et la décennie 1986-1996 la plus déficitaire. La période (2002,2008) apparaît comme excédentaire à l'est du nord Algérien, par contre, elle indique un retour vers la normale à l'Ouest et au centre de la zone d'étude (**Taibi, 2011**).

#### I.3.2.1.2 Les régimes pluviométriques et les cycles de sécheresse

En utilisant la seule donnée de précipitation dans une nomenclature climatique, on parvient à définir une répartition mondiale des différents régimes pluviométriques. Pour identifier et classer les diverses régions pluviométriques du globe, on a habituellement recouru aux précipitations moyennes mensuelles ou annuelles (évaluées sur une longue période) et à leurs variations.

La précipitation moyenne annuelle établie sur un grand nombre d'année (hauteur moyenne des précipitations annuelles tombant à un endroit donné) est aussi appelée sa valeur

normale, son module annuel ou sa valeur interannuelle. Une classification pluviométrique générale basée sur les données annuelles est fournie par le tableau suivant. :

**Tableau I.1 : Régimes pluviométriques du monde (Tiré de Champoux, Toutant, 1988) :**

Nom	Caractéristiques
Régime équatorial humide	- plus de 200 cm de précipitations annuelles moyennes
Régime subtropical humide en Amérique	- entre 100 et 150 cm de précipitation annuelle moyenne
Régime subtropical sec	- moins de 25 cm de précipitation annuelle moyenne
Régime intertropical sous l'influence des alizés	- plus de 150 cm de précipitation annuelle moyenne
Régime continental tempéré	- entre 10 et 50 cm de précipitation annuelle moyenne
Régime océanique tempéré	- plus de 100 cm de précipitation annuelle moyenne
Régime polaire et arctique	- moins de 30 cm de précipitation annuelle moyenne

### I.3.2.2 Variabilité spatiale des précipitations

La spatialisation des irrégularités des précipitations peut être approchée par le coefficient de variation ( $C_v$ ) des séries de mesures disponibles. Ce coefficient permet une comparaison entre les stations. La variabilité interannuelle des pluies augmente lorsque l'on se rapproche des régions arides. L'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude et la diminution de la latitudinale.

L'altitude atténue cet accroissement (M. Meddi, H. Meddi, 2009). L'analyse du régime pluviométrique à l'échelle spatial par le coefficient de la variation n'a fait que confirmer la

forte variabilité des précipitations d'Est en Ouest du nord au sud. Qui est liée principalement aux grands ensembles géographiques du pays (Taibi, 2011).

### **I.3.3 Influence de la variabilité des pluies sur les régimes des cours d'eau**

Les précipitations, qui sont le facteur principal de l'alimentation des cours d'eau, ont une influence sur la variabilité des écoulements à toutes les échelles de temps.

L'étude des séries hydrométriques menée sur une durée assez longue permet donc d'évaluer la réponse des rivières aux variations du climat.

La notion de précarité des ressources en eau n'est pas récente. Cependant, la sécheresse qui a affecté les pays du bassin méditerranéen lors des dernières décennies s'est manifestée d'une manière particulièrement sévère, persistante et caractérisée par une intensité remarquable avec des conséquences dramatiques liées aux déséquilibres importants des ressources en eau aussi bien quantitativement que qualitativement. Il ressort que les pluies se caractérisent par une grande variabilité interannuelle et intra-annuelle. Cette variabilité a entraîné celle des ressources en eau de surface et souterraine et par conséquent des disponibilités en eau. La diminution des précipitations a bien sûr des répercussions sur les lames d'eau écoulées mensuelles. A noter aussi que les écoulements de la fin de l'été et de l'automne sont peu ou pas diminués, ce qui peut résulter de la violence de certains épisodes de crue.

## **I.4 Nécessite de la cartographie des pluies**

Les précipitations sont des processus variables aussi bien dans l'espace que dans le temps. Lorsque cette variabilité est caractérisée par une certaine cohérence, celle-ci définit leur structure. En hydrométéorologie, dans le cadre de l'interpolation des champs pluviométriques, il a été montré que les méthodes stochastiques, telles que celles utilisées en géostatistique, donnent de meilleurs résultats que les méthodes déterministes ; du fait qu'elles tiennent compte de la structure spatiale des champs considérés (Obled, 1982 ; Lebel, 1984).

### **I.4.1 Objectif de la cartographie des pluies**

La cartographie de la pluviométrie moyenne permet le passage de l'information ponctuelle à une information couvrant tout l'espace du bassin versant. Il sera possible dans une seconde phase de calculer la pluie moyenne entrant dans les bilans hydrologiques. Elle permet aussi de rectifier certaines isohyètes dans les zones mal desservies en stations de mesure.

---

---

## I.5 Application de la cartographie dans la gestion des ressources en eau

Dans la matière de la gestion des ressources, les méthodes de cartographie et les nouvelles techniques telles que Systèmes d'Information Géographiques se présentent comme des technologies efficaces. Ayant un large domaine d'application, ils ont montré une grande efficacité dans la matière de la gestion des ressources grâce à leur performance dans le géo-référencement. Ils offrent des outils appropriés pour la combinaison de données spatiales ainsi que des modèles sur un même support graphiques. Ceci permettra une communication des informations entre les intervenants afin d'assurer une bonne coordination des activités.

### I.5.1 Cas des pluies

La carte pluviométrique, fréquemment utilisée dans les études hydro climatologiques, constitue un outil de travail pour les projeteurs. Sa réalisation exige de résoudre deux séries de problèmes : homogénéisation des données (utilisation des composantes principales pour tester la fiabilité des données et pour le comblement des lacunes), variographie et interpolation des données aux nœuds d'une grille. La carte permet de passer d'une connaissance ponctuelle à une connaissance spatiale du phénomène ; elle permet le passage d'une information brute à une information traitée, interpolée et numérisée. A l'aval, elle permet aussi l'estimation correcte des lames précipitées pour le calcul des bilans hydrologiques des bassins. (**Mebarki, 2003**).

On peut citer les principales applications de la cartographie des pluies:

- Cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued Seybouse (nord-est algérien). (**Louamri, 2009**).
- Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. (**Touazi et Laborde, 2000**).
- Cartographie automatique des précipitations : application à l'est algérien. (**Mebarki, 2003**).

### I.5.2 Cartographie des ressources en eau souterraines

La cartographie des ressources en eau souterraines (cartographie hydrogéologique) est l'outil de base qui procure ces connaissances. Elle comprend toutes les activités nécessaires pour recueillir, documenter, interpréter et représenter l'information hydrogéologique sous forme de documents cartographiques. Elle permet de délimiter et de caractériser les formations aquifères, d'évaluer la recharge et d'établir le degré de vulnérabilité des nappes.

Toutes ces étapes de caractérisation fournissent les informations nécessaires pour dresser l'inventaire de la ressource en eau souterraine et réaliser le travail de classification des eaux souterraines qui permettront aux divers intervenants locaux de mettre en œuvre un programme de gestion des eaux souterraines.

Les projets à l'échelle régionale de cartographie hydrogéologique permettent de collecter des renseignements de diverses organisations publiques ou parapubliques. L'intégration de ces renseignements servira à produire des documents cartographiques ainsi qu'un système d'informations hydrogéologiques à références spatiales. (Fagnan, Lefebvre, Michaud, 2008).

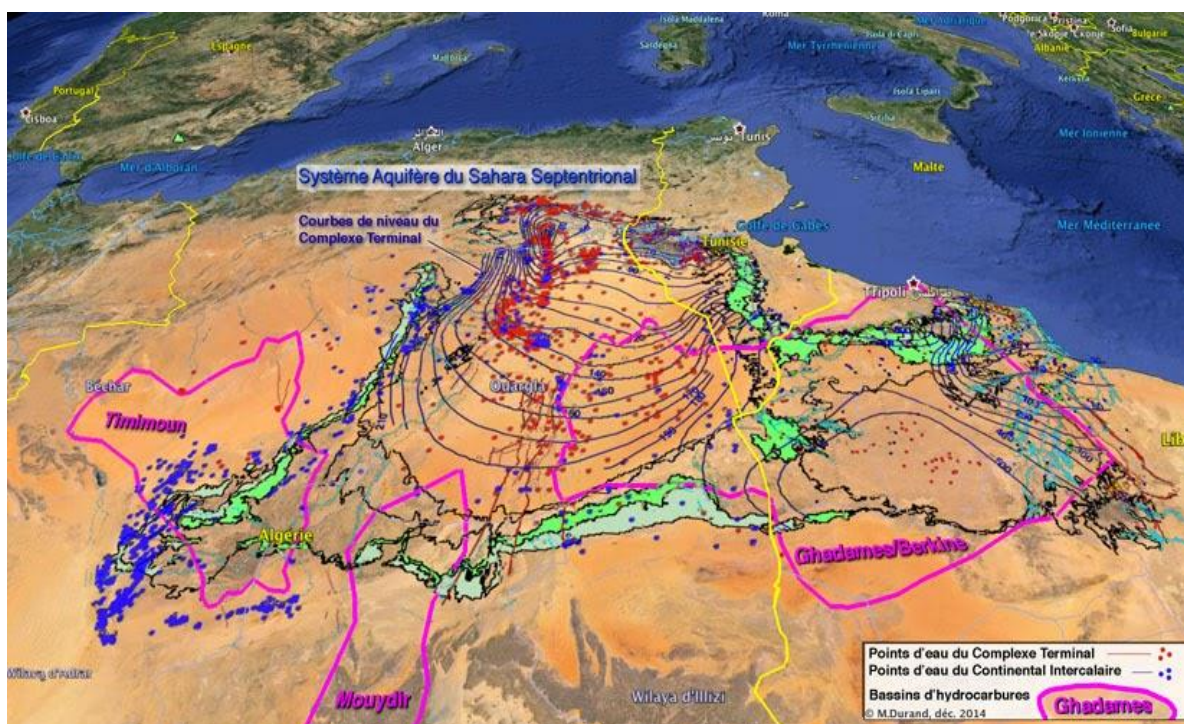


Figure I.3 : Cartographie des ressources en eau souterraines du Sud Algérien

### I.5.3 Cas de la protection contre les crues :

La cartographie dédiée aux risques inondation permet de connaître le danger auquel les populations sont exposées. Elle repose sur l'utilisation des images satellitaires pour la délimitation exacte des zones touchées par les inondations.

Le suivi est assuré grâce à l'activation de la Charte Internationale des catastrophes naturelles.

Cela permet effectivement :

- De cartographier les zones d'épandage.

- D'évaluer les dommages.
- De faire des comparaisons avant et après la crise.
- D'avoir l'accès à l'information si possible en temps réel.

### **I.5.3.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation :**

- a. Les relevés sur le terrain
- b. La modélisation hydraulique
- c. La télédétection
- d. La télédétection radar.

### **I.5.4 Cas de l'agriculture :**

#### **I.5.4.1 Une méthode de cartographie de la salinité des sols**

Les données acquises à l'aide du conductimètre électromagnétique sont traitées numériquement par des méthodes géostatistiques, en particulier, des cartes sont tracées à partir d'une interpolation par krigeage. L'étude des variogrammes peut également fournir des renseignements sur la variabilité spatiale de la mesure, susceptibles d'orienter les modes d'échantillonnage futurs. L'emploi de ces méthodes se trouve facilité par le développement de logiciels conversationnels fonctionnant sur micro-ordinateurs et pouvant même être utilisés sur du matériel portable.

L'emploi de la géostatistique s'impose dans ce type de situation. Il s'agit en effet de cartographier une seule variable, non corrélée de façon simple à des variations morpho-pédologiques. En outre, la cartographie est souvent mise en œuvre à une échelle détaillée, à l'intérieur d'une unité pédologique ; le choix de périmètres irrigués se situe le plus souvent en zone alluviale à topographie plane.

Enfin, la cartographie de la salinité doit pouvoir être répétée, en procurant une évaluation convenable de la variabilité temporelle. Les divers documents établis au cours du temps doivent donc être tracés avec une méthodologie précise, ou dénuée d'empirisme, de façon à assurer la cohérence des comparaisons et des interprétations qui seront faites (**Boivin, Hachicha, Job, Loyer, 1989**).

### **I.5.5 Problème de désertification**

Le terme « désertification » est souvent associé à l'avancée du désert et aux dunes de sable envahissant lentement des régions fertiles. Les grands déserts de notre planète sont en

---

---

fait des écosystèmes naturels dont les limites peuvent avancer ou reculer d'une manière ou d'une autre (Oussedik et al, 2003). Selon la Convention contre la désertification, la désertification est définie comme étant « la dégradation des sols en région aride et semi-aride sous l'effet des changements climatiques et de l'activité humaine ». Ce terme est souvent utilisé pour décrire des conditions qui s'apparentent à l'avancée du désert.

C'est dans ce contexte qu'un plan de développement des zones arides et de lutte contre la désertification en Algérie a été décidé par les autorités algériennes. Étant donné l'étendue du territoire et de la région touchée par ce phénomène, la télédétection a été retenue comme outil d'investigation.

Le Centre national des techniques spatiales, a pris en charge l'étude des zones exposées au risque de désertification afin d'effectuer un zonage de l'écosystème steppique en fonction de sa dégradation et d'établir la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification à l'échelle 1/200 000 sur l'ensemble des wilayas de la zone steppique, (Oussedik et al, 2003).

## **I.6 Apport des SIG dans la gestion des ressources en eau**

Les dernières décennies ont vu la capacité de stocker, gérer et analyser l'information relative aux ressources en eau à un coût acceptable se multiplier à une vitesse impressionnante. On en arrive paradoxalement à une situation dans laquelle les données de base nécessaires à l'utilisation des logiciels et modèles disponibles font de plus en plus défaut à l'heure où la rareté croissante de l'eau exige une connaissance toujours plus précise de la ressource et de son utilisation.

Les banques de données relationnelles sont maintenant à la portée de la plupart des services techniques responsables de la gestion de l'eau. Les récents développements dans le domaine de cartographie (SIG, Télédétection et bases de données) permettent de mettre en place des systèmes décentralisés de collecte, analyse et diffusion de l'information, beaucoup plus aisés à gérer que les systèmes centralisés existant jusqu'à présent.

Les progrès récents dans le domaine des SIG permettent d'obtenir à peu de frais une information détaillée sur l'utilisation des terres et notamment sur les terres irriguées. Combinés avec des systèmes d'information géographique et des modèles appropriés, ils permettent le développement de systèmes d'appui à la décision particulièrement utiles pour la planification et même la gestion en temps réel des ressources en eau. Au niveau local, ils permettent également de fournir une information en temps réel concernant les besoins en eau.



Ces technologies représentent un atout considérable dans la recherche d'une gestion appropriée des ressources en eau. Encore faut-il que les utilisateurs soient en mesure d'y avoir accès et d'en assurer la gestion et l'entretien, notamment pour ce qui concerne la collecte de l'information de base.

### **I.7 Conclusion**

La revue bibliographique sur les précipitations et l'impact de leurs variabilités spatio-temporelles ainsi que leur impact sur les cours d'eaux en général nous a permis de comprendre la difficulté de mesure de cette dernière.

Cela nous ramène à penser aux différentes méthodes de cartographie méthodes telles que celles utilisées en géostatistique, donnent de meilleurs résultats du fait qu'elles tiennent compte de la structure spatiale. L'approche théorique sur les méthodes de la cartographie sera détaillée dans le chapitre II.

## ***Chapitre II : Les méthodes de cartographie des pluies***

### **Introduction**

En Algérie du Nord où domine un climat de type méditerranéen, les précipitations se caractérisent par une forte variabilité spatio-temporelle. Elles constituent, par ailleurs, le facteur le plus fortement explicatif des régimes hydrologiques des cours d'eau. L'indispensable connaissance spatiale de cet élément, dans toute étude hydro-climatologique, montre l'intérêt d'une cartographie qui soit tout à la fois objective et reproductible.

Ce chapitre présente une revue des principales méthodes d'interpolation spatiale afin de comprendre leurs principes de base et de comparer le krigeage aux autres méthodes.

### **II.1. Définition de la cartographie :**

La cartographie a pour but la représentation de la terre ou d'une autre planète sous une forme géométrique et graphique grâce à la conception, la préparation et la réalisation de cartes. La cartographie est à la fois une science, un art et une technique.

C'est une science, car ses bases sont mathématiques, notamment en ce qui concerne la détermination de la forme et des dimensions de la terre puis le report la surfaces courbe de la terre sur un plan (la carte) grâce au système des projections et enfin l'établissement d'un canevas planimétriques et altimétrique l'enjeu est la précision et la fiabilité de la carte. (Poidevin ,1999).

### **II.2. Cartographie numérique et/ou automatique :**

#### **II.2.1 Objectif de la cartographie : l'interpolation spatiale :**

À partir d'un champ dont on connaît certaines valeurs prises par la variable régionalisée, on veut déduire la représentation d'ensemble de cette variable sur le champ. Cette représentation peut se faire sous la forme : de lignes de niveau, de niveaux de couleur, d'une perspective 3D, etc. On retrouve sur les figures suivantes différents modes de représentation du champ interpolé :

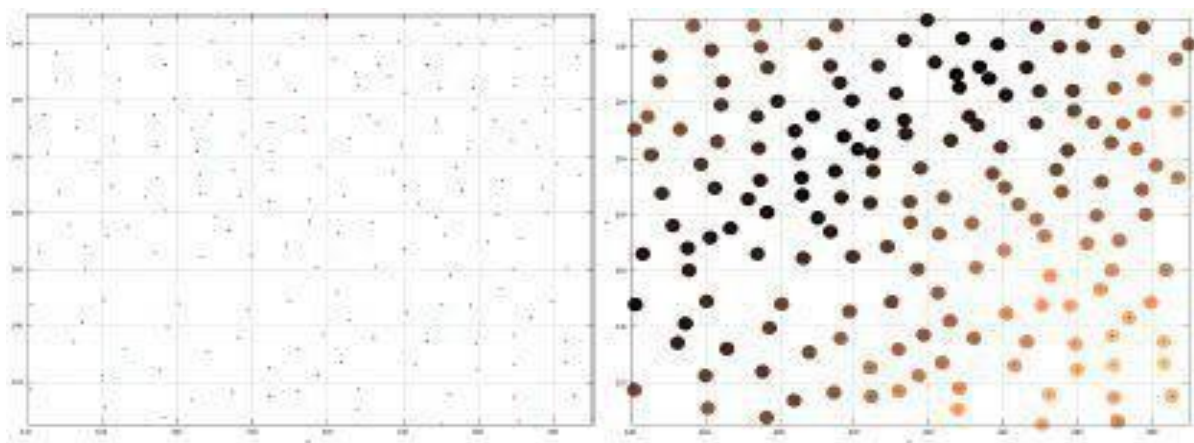


Figure II.1 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : sites d'observation.

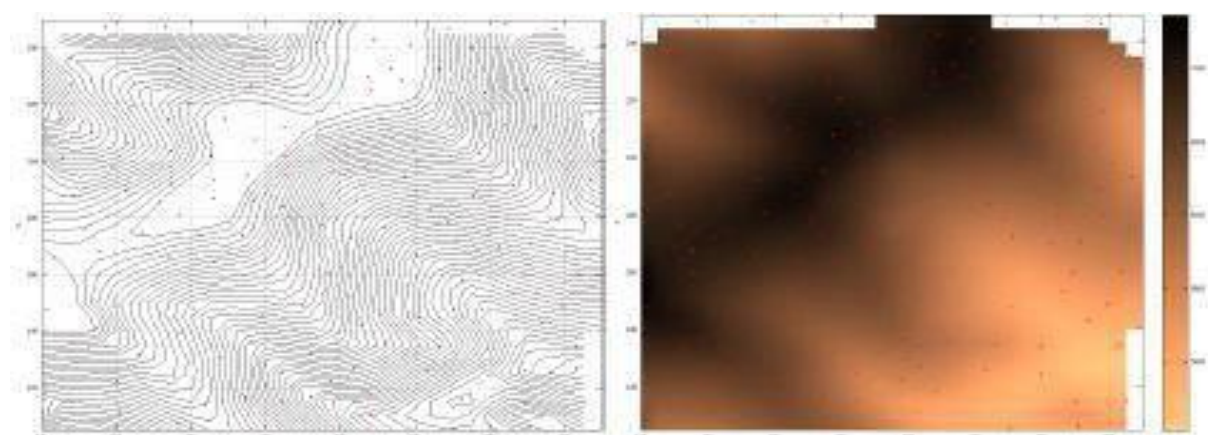


Figure II.2 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : représentation splanes.

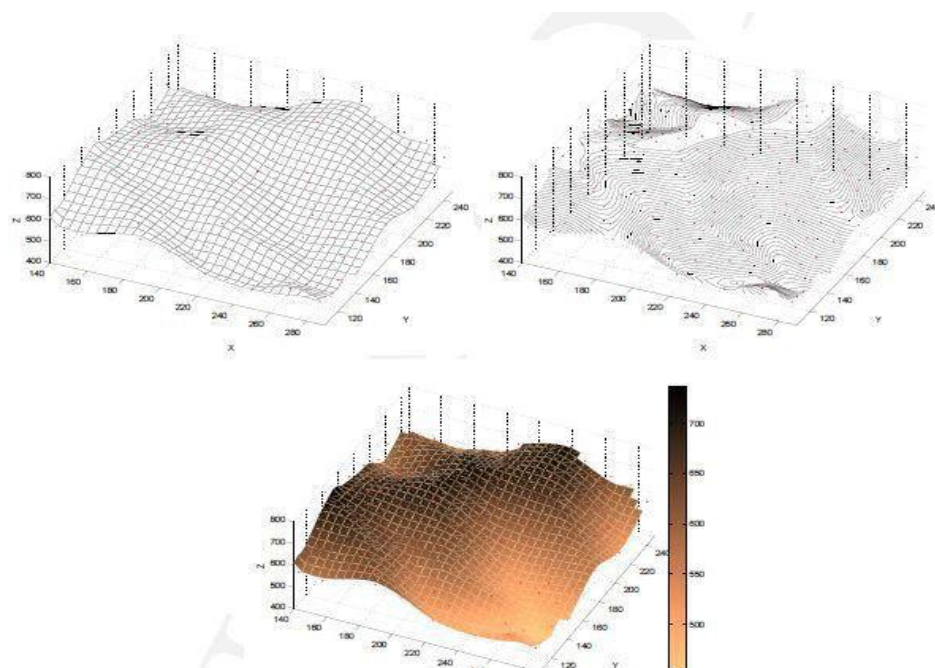


Figure II.3 : Exemple de représentation d'une variable régionalisée : perspectives.

Dans le cas général, la variable régionalisée ne peut être représentée par une fonction mathématique explicite. Cependant, elle présente une structuration spatiale bien définie, avec une corrélation des valeurs prises en deux sites proches. Pour cela il existe de nombreuses façons de dériver une prévision pour chaque emplacement ; chaque méthode est connue sous la forme d'un modèle. Avec chaque modèle, des suppositions différentes sont faites concernant les données et certains modèles conviennent mieux à des données particulières (par exemple, un modèle peut prendre en compte une variation locale mieux qu'un autre). Chaque modèle produit des prévisions à l'aide de calculs différents.

Les outils d'interpolation sont divisés généralement en méthodes déterministes et géostatistiques :

- **Méthodes déterministes** : elles supposent une modélisation déterministe du phénomène ; ces méthodes se basent alors sur des propriétés purement mathématiques, généralement géométriques, sans tenir compte du phénomène physique qui nous intéresse.
- **Méthodes stochastiques** : elles supposent une modélisation probabiliste du phénomène, dont les observations résultent de la réalisation de variables aléatoires ; ces méthodes font alors appel à des modèles découlant de l'analyse statistique des données considérées.

### II.2.2 Les triangulations :

C'est une Interpolation à partir d'une triangulation Définition La triangulation consiste à diviser le champ en triangles disjoints dont les sommets sont les sites d'observation. On calcule alors la valeur en un point donné à partir des valeurs des sommets du triangle auquel il appartient. Il existe plusieurs méthodes de triangulation, la plus utilisée étant la triangulation de Delaunay. Notons les propriétés d'une telle triangulation : La triangulation est indépendante de l'ordre de traitement. L'ensemble du domaine n'est pas recouvert : on opère uniquement dans l'enveloppe convexe des sites.

### II.2.3 Polygones de Thiessen :

Pour tous les sites d'observation du champ, on définit un polygone d'influence tel que chaque point du polygone est plus proche du point d'observation.

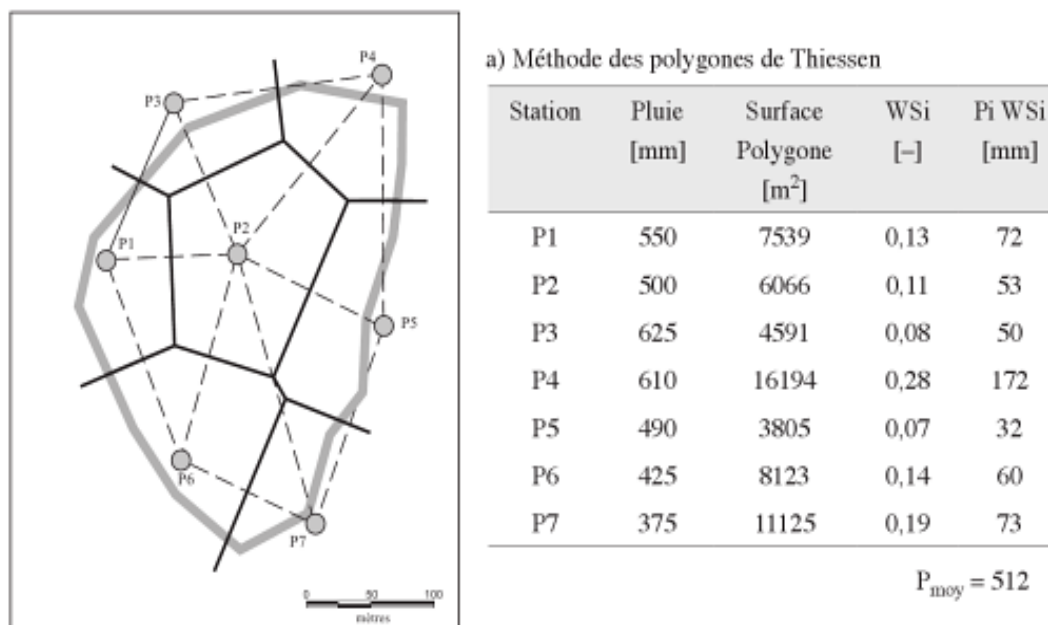
L'interpolation par la méthode de Thiessen consiste à affecter à l'ensemble des points d'un polygone donné la valeur de la variable régionalisée correspondante (on parle aussi de plus proche voisin).

Le découpage de Thiessen dépend uniquement de la configuration géométrique et non pas des valeurs observées. Les polygones ne sont pas nécessairement fermés dans certaines directions de l'espace : il faut ainsi limiter la partition aux frontières de D, ou fixer une distance d'influence limite.

En hydrologie la méthode de Thiessen est l'une des plus utilisée pour estimer les précipitations en un point donnée. Elle définit la zone d'influence de chaque pluviomètre comme étant l'ensemble des points au sein du bassin étudié, qui ont pour plus proche station de ce pluviomètre (Fig. 4).

Le facteur de pondération de ce dernier est alors proportionnel à l'aire  $A_i$  de ce bassin :  $a_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$ .....(II.1)

La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement).



**Figure II.4 : Exemple d'application de la méthode de Thiessen.**

### II.2.3 Méthode des isohyètes (isovaleurs):

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (isovaleurs de pluies annuelles, mensuelles, journalières, etc.). Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes, on peut tracer le réseau d'isohyètes. (Musy, 2005).

Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i * P_i}{A}, \text{ avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \dots\dots\dots (II.2)$$

Avec :

P<sub>moy</sub> : précipitation moyenne sur le bassin,

A : surface totale du bassin,

A<sub>i</sub> : surface entre deux isohyètes i et i+1,

K : nombre total d'isohyètes,

P<sub>i</sub> : moyenne des hauteurs h de précipitations entre deux isohyètes i et i+1.

**II.2.5 Méthodes barycentriques :**

Inverse des distances N'étant pas limitées au voisinage direct du point d'intérêt, les méthodes barycentriques présentent l'avantage de prendre en compte plus de données du champ d'observation. Un poids plus important est affecté aux sites les plus proches, un poids moindre aux sites plus éloignés. L'interpolation par inverse des distances est la méthode barycentrique la plus employée. Elle consiste à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance entre les sites et le point à estimer :

$$\hat{z}(\vec{s}) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(\vec{s}_i)}{\|\vec{s}_i - \vec{s}\|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|\vec{s}_i - \vec{s}\|^p}} \dots\dots\dots (II.3)$$

**II.2.6 Les tendances :**

On cherche à ajuster par moindre-carré une surface polynomiale aux valeurs observées. Cette surface se présente sous la forme :

$$\hat{z}(\vec{s}) = \hat{z}(x, y) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^{p-i} a_{ij} x^i y^j \dots\dots\dots (II.4)$$

Où p est le degré du polynôme ou ordre de la surface. Les a<sub>ij</sub> sont obtenus par minimisation de la quantité  $\sum_{i=1}^n [\hat{z}(\vec{s}_i) - Z(\vec{s}_i)]^2$  par moindre-carré par exemple. il faut alors que le degré

du polynôme vérifie  $\frac{1}{2}(p + 1)(p + 2) \leq n$ . L'inversion peut s'écrire sous la forme matricielle suivante. (Bossier, 2013):

$$\begin{pmatrix} x_1^0 y_1^0 & \dots & x_1^0 y_1^p & x_1^1 y_1^0 & \dots & x_1^1 y_1^{p-1} & \dots & x_1^p y_1^0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_n^0 y_n^0 & \dots & x_n^0 y_n^p & x_n^1 y_n^0 & \dots & x_n^1 y_n^{p-1} & \dots & x_n^p y_n^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{0,0} \\ \vdots \\ a_{0,p} \\ a_{1,0} \\ \vdots \\ a_{1,p-1} \\ \vdots \\ a_{p,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}$$

**II.2.7 Les fonctions Spline**

Les splines sont une famille de fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement. Dans notre contexte, il existe deux catégories de fonctions de splines : les splines d'interpolation qui passent exactement par les points d'observation et les splines de lissage qui passent à proximité.

On désire obtenir une fonction qui soit la plus lisse possible tout en restituant les valeurs mesurées aux différents sites d'observation. Elle doit minimiser l'énergie de flexion :

$$\int \int \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial y^2} dx dy \dots \dots \dots (II.5)$$

**II.2.8 Méthodes d'interpolation basées sur l'intelligence artificielle**

Le principe des réseaux de neurones artificiels est né dans les années 1940 à partir d'une analogie avec le système nerveux humain. En 1943 deux chercheurs Mr Culloch et Pitts ont inventé le premier « neurone artificiel », qui correspondait à un produit d'un vecteur d'entrées et un vecteur poids suivi d'un élément de seuillage (Benkaci, 2006).

La cartographie basée sur l'intelligence artificielle est un nouveau concept inspiré de l'interpolation des séries temporelle. L'utilisation de réseaux de neurones artificiels par exemple ou de la logique floue est une des techniques les plus récentes. Elle a pris son essor depuis une quinzaine d'années et a été rarement utilise pour l'interpolation de variable climatique. Cette méthode reprend les principes de fonctionnement du système nerveux des êtres vivants : un réseau d'éléments unitaires (les neurones) qui transmettent une seule information, de façon plus ou moins intense. L'interconnexion des neurones permet de

véhiculer une information de complexité croissante en fonction du nombre de neurones et du nombre de connexion qui le relie.

### II.2.9 Méthodes géostatistiques

Les méthodes géostatistiques sont souvent utilisées pour les problèmes impliquant des transformations non linéaires des variables mesurées. En hydrogéologie, les problèmes inverses sont traités par ces méthodes. Le paramètre inconnu peut être le coefficient de perméabilité transmissivité, coefficient de dispersion, les conditions aux limites peuvent être identifiées.

Les paramètres sont considérés comme étant des variables aléatoires à cause de la nature hétérogène du milieu, en examinant la distribution spatiale des valeurs ponctuelles à la méthode de krigeage développées pour la prospection minière dans les années 50 (**Mathron,1960**) offre l'avantage d'avoir la variance d'estimation minimale (**Laborde ,2000**), ce problème de simulation peut être résolu en deux étapes :

1. La moyenne et la fonction de variance sont estimées par les observations (données brutes)
2. L'estimation du champ (piézométrie ou concentration) est conditionnée par les observations pour obtenir les meilleures réalisations.

### II.2.10 Cartographie satellitaire

#### II.2.10.1 La télédétection

La télédétection se rapporte à l'ensemble des techniques liées à l'analyse et à l'exploitation des données obtenues par des satellites d'observation des ressources terrestres et environnementales et par photographie aérienne.

L'objectif principal de la télédétection est de cartographier les ressources terrestres et d'en effectuer le suivi. Par rapport aux techniques de levée classique, la télédétection par satellite est précise et rentable, et permet d'obtenir des données en temps utile.

Un satellite de télédétection est un satellite artificiel qui effectue des observations distance par réception d'ondes électromagnétiques l'aide de capteurs passifs et actifs. Ceux-ci peuvent être des caméras ou des spectromètres (instruments passifs). Des radars (instrument actifs) ...etc., le satellite de télédétection s'oppose au satellite qui effectue des observations en utilisant des instruments effectuant des mesures in situ par exemple étudier le champ magnétique, le champ électrique, ...etc. (**Benmostefa,2012**).



### II.2.10.2 Le radar

Une lame d'eau radar est une estimation spatialisée des cumuls de pluie basée sur les observations de réflectivité radar. Actuellement, elle est souvent fournie avec une résolution de 1 km<sup>2</sup>. La pluie de bassin issue d'une telle lame d'eau n'est autre que la moyenne des cumuls observés à chaque pixel inclus dans le bassin versant. Pour un bassin de taille suffisamment grande, l'incertitude ne provient donc pas de ce calcul, mais de l'estimation de la lame d'eau déduite de l'observation radar.

En effet, un radar hydrométéorologique émet dans l'atmosphère un faisceau d'ondes électromagnétiques réfléchi espar les précipitations qu'elles rencontrent. Le signal en retour est capté et traité par le radar: il est appelé réflectivité ( $Z$ , en mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>). Cette réflectivité est convertie en cumul de pluie par unité de temps ( $R$  en mm/h) à l'aide de la relation de Marshall-Palmer dite « loi  $Z/R$  »:  $Z=a*R^b$ .

On peut distinguer deux catégories de sources d'erreur affectant la qualité des estimations de précipitation par radar.

#### Erreur liée à la mesure de la réflectivité

En dehors des erreurs de mesure de l'appareil lui-même (réduites au minimum par son contrôle), la mesure physique de la réflectivité peut d'abord être entachée de plusieurs erreurs :

- Échos de sol et masque : la présence d'obstacles dans la trajectoire du faisceau notamment aux faibles angles de site (angle de tir par rapport à l'horizontale) crée des échos fixes de forte ou faible réflectivité sur l'image radar. En outre, la zone située en arrière de l'obstacle se trouve partiellement ou totalement occultée : cela constitue le phénomène de masque. L'atténuation du signal par des cellules précipitantes proches du radar peuvent également « masquer » partiellement des pluies plus éloignées.
- Bande brillante : un pic de réflectivité est observé lorsque les ondes franchissent l'isotherme 0 °C, simulant une forte intensité précipitante. Le profil vertical de réflectivité n'est pas homogène. Ce phénomène est dû à l'augmentation des sections efficaces de rétrodiffusion des particules de neige et de glace en fusion progressive lors de la traversée de l'isotherme ;
- Mauvaise prise en compte de la nature des météores : comme ci-dessus, la neige et la grêle n'ont pas la même réflectivité que des gouttelettes d'eau liquide ;

- Certaines conditions particulières de l'atmosphère peuvent perturber la propagation des ondes. Les profils verticaux de température et de pression partielle peuvent varier brutalement en fonction de l'altitude, induisant de fortes variations de l'indice de réfraction de l'air ;

#### ➤ **Calibration de l'estimation de la lame d'eau**

Les estimations de précipitation basées sur une relation de Marshall-Palmer générique peuvent conduire à de fortes incertitudes. Pour pallier cette difficulté, les paramètres de la conversion entre réflectivité et précipitation peuvent être calés au droit des postes pluviométriques par comparaison de l'estimation radar aux observations au sol. Ainsi, la plupart des estimations de lames d'eau basées sur des images radar sont aujourd'hui une combinaison de l'information radar et des mesures ponctuelles.

### **II.3 La géostatistique : Approche théorique**

La géostatistique est l'étude des variables régionalisées, initialement appliquée aux gisements miniers (**Krig, 1957**). Les méthodes géostatistiques reposent sur des modèles statistiques qui comprennent l'auto-corrélation (relations statistiques entre les points mesurés). Ces techniques ont la capacité de produire des surfaces de prévision, mais elles permettent également d'obtenir une mesure de précision de ces prévisions.

#### **II.3.1 Le krigeage : définition et concepts de base**

Les grandeurs de l'hydrogéologie (piézométrie, transmissivité ou perméabilité, coefficient d'emmagasinement, infiltration de la pluie,) sont très variables dans l'espace. Cependant leur variabilité spatiale n'est pas purement aléatoire : les mesures effectuées en deux points différents ont d'autant plus de chance d'être semblable que ces points sont plus rapprochés.

Une certaine corrélation spatiale régit la distribution de ces grandeurs appelées variables régionalisées (**Matheron, 1969**).

Il existe deux grandes catégories de variables régionalisées :

-Les variables non stationnaires dont la structure spatiale présente des tendances bien marquées dans certaines directions comme c'est le cas pour la piézométrie ;

-Les variables stationnaires pour lesquelles ils n'existent a priori pas de telles tendances régulières, ce qui est généralement le cas de la transmissivité.

L'approche de la géostatistique a pour premier objet l'estimation des variables régionalisées : comment estimer la valeur de la variable en certains points (par exemple au centre de mailles ou aux nœuds d'une grille régulière), à partir d'observations faites sur un ensemble nécessairement limité de points de mesure.

Le krigeage est une méthode d'estimation applicable aussi bien aux variables stationnaires que non stationnaires, la méthode est qualifiée optimale car, moyennant certaines hypothèses, elle fournit un estimateur :

- Sans biais,
- D'erreur quadratique moyenne minimale (c'est-à-dire de variance minimum).
- De plus, chaque valeur estimée pourra être assortie de la variance minimale calculée que l'on pourra considérer comme un indicateur de précision.

Outre les problèmes d'interpolation, le krigeage peut également :

- Servir à évaluer des valeurs moyennes sur des blocs donnés : sous-ensemble du domaine d'étude, maille d'un modèle mathématique...
- Déterminer le nombre optimum de points d'observation d'un réseau de mesures, ainsi que l'emplacement le plus approprié de ces points, de façon à minimiser les investissements à réaliser pour une précision attendue.

Le krigeage est une méthode élaborée dans un cadre probabiliste (celui de la théorie des fonctions aléatoires). Le développement des calculs d'estimation nécessite en effet des hypothèses sur la structure du champ des variables et ces hypothèses doivent permettre de résoudre les problèmes d'inférence statistique des grandeurs qui interviennent dans les calculs : en particulier le variogramme et la covariance généralisés porteurs de l'information structurale sur le champ des valeurs.

L'estimation  $z_0^*$  proposée au point  $X_0$  est une combinaison linéaire des valeurs  $Z_i$  de la variable en différents points  $X_i$  d'un voisinage à définir :

$$z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \dots \dots \dots (II.6)$$

Les coefficients de pondérations  $\lambda_{k_i}$  seront calculés de façon à ce que cet estimateur soit sans biais et d'erreur quadratique moyenne minimale, ce qui se traduit par :

$$E [z_0^* - Z_0] = E [\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z_0] = 0 \quad (\text{condition de non biais})$$

$$E [(z_0^* - Z_0)^2] \quad \text{minimum}$$

Dans le cas d'un phénomène non stationnaire dans l'espace (comme une piézométrie, la variable représentative de ce phénomène peut être décomposés en :

- ❖ Une dérive  $m(x)$  suppose modélisable, tout au moins localement, par une expression du type :  $m(x) = \sum_{l=1}^k a_l f^l(x)$   
Ou les  $f^l(x)$  sont le plus souvent des monômes (avec  $f^0(x) = 1$ ) et ou les  $a_l$  sont des coefficients à déterminer.
- ❖ Une fonction aléatoire  $Y(x)$ , de moyenne nulle, intégrant les fluctuations du champ de valeurs.

### II.3.1.1 Le variogramme

Une grandeur essentielle apparaît en géostatistique : le variogramme qui permet d'analyser la structure spatiale du champ de valeurs de la variable étudiée et en particulier de mettre en évidence les éventuelles corrélations entre points de mesure.

Le krigeage utilise la notion de variogramme qui caractérise la structure du champ et celle de covariance généralisé (théorie des fonctions aléatoires intrinsèque d'ordre  $k$ ) qui se substitue au variogramme dans les calculs d'estimation quand il y a lieu de prendre en compte une dérive (en l'absence de dérive, la covariance s'identifie au variogramme)

Les coefficients de pondération  $\lambda_i$  sont toujours obtenus par résolution d'un système linéaire comportant autant d'équations que points intervenant dans l'estimation et que de contraintes liées à la technique de krigeage utilisée (conditions de non biais, dérive).

Si  $Z(x)$  et  $Z(x+h)$  sont deux variables associées aux mesures  $z(x)$  et  $z(x+h)$  faites en deux points distants de  $h$ , le variogramme est alors défini par la fonction :

$$2\gamma(h) = \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] \dots \dots \dots \text{(II.7)}$$

Qui est la variance de l'accroissement de la variable  $Z$  pour un accroissement  $h$  de la distance.

$\gamma(h)$  est le « demi-variogramme » (par extension le variogramme) ;

#### 1. Estimation du variogramme :

On estime le variogramme à l'aide de l'expression suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \dots \dots \dots \text{(II.8)}$$

Où  $n(h)$  désigne le nombre de couples de points distants de la valeur  $h$ .

**2. Modélisation du variogramme :**

On définit la covariance empirique :

$$C^*(h) = \frac{1}{n_h} \sum_{s_i, s_j \in S_h} z_i z_j - \bar{z}^2 \dots \dots \dots (II.9)$$

$$\text{Ou } \bar{z} = \sum_i z_i,$$

Et (en supposant que la dérive est nulle), le variogramme empirique par

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{s_i, s_j \in S_h} (z_i - z_j)^2 \dots \dots \dots (II.10)$$

$$\text{Ou } S_h = \{(s_i, s_j) : |s_i - s_j| \approx h\} \text{ et } n_h = \text{Card}S_h.$$

Ces deux quantités permettent d'estimer respectivement C et  $\gamma$  lorsque Z est stationnaire d'ordre deux.

**3. Types de modèles courants :** En géostatistique, les modèles les plus courants sont :

- Effet de pépite.
- Puissance (cas particulier : linéaire).
- Sphérique. - Gaussien. - Exponentiel.

➤ Effet de pépite:  $\gamma(h) = 0$  si  $h = 0$

Co si  $h > 0$

➤ Sphérique :  $\gamma(h) = C [1.5 h/a - 0.5 (h/a)^3]$  si  $0 < h < a$   
C si  $h \geq a$

Gaussien:  $\gamma(h) = C [1 - \exp(-3(h/a)^2)]$

Exponentiel  $\gamma(h) = C [1 - \exp(-3h/a)]$

➤ Puissance  $\gamma(h) = C h^b$   $0 < b$

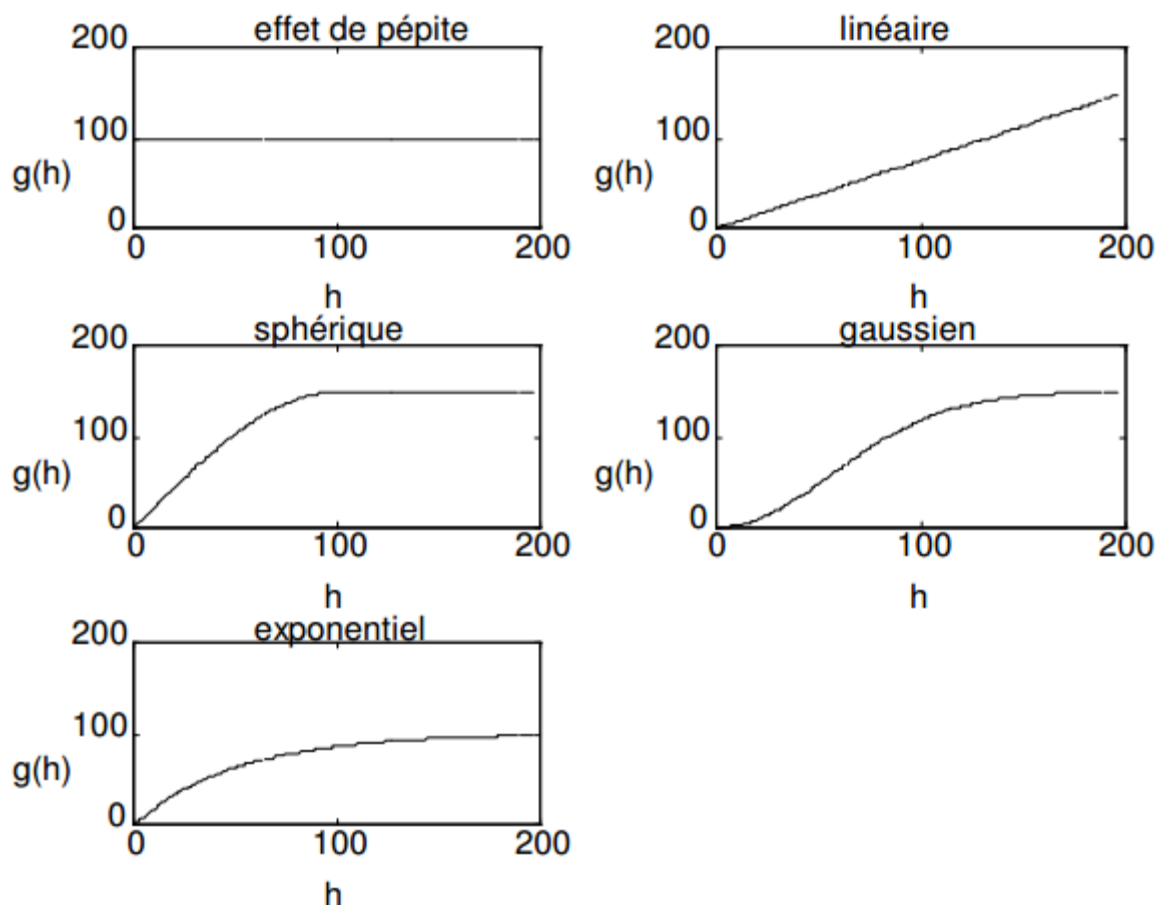


Figure II.6 : Type de modèles d'ajustement des variogramme

#### 4. Anisotropies

La continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions.

Ex. - gisement présentant une forme lenticulaire; on peut avoir une meilleure continuité selon l'allongement principal des lentilles;

- gisement stratiforme; meilleure continuité parallèlement aux strates que perpendiculairement.

- placer; meilleure continuité le long des paléo chenaux que perpendiculairement.

Bien que dans la nature il existe une très grande variété d'anisotropies, en géostatistique, on ne peut modéliser aisément que les anisotropies géométriques. Les autres anisotropies peuvent être approchées en combinant plusieurs modèles isotropes ou avec anisotropie géométrique.

- Le facteur d'anisotropie géométrique obtenu avec les variogrammes expérimentaux sous estime en général le véritable facteur d'anisotropie en raison de l'utilisation d'une fenêtre angulaire et du fait que les variogrammes

expérimentaux ne sont pas nécessairement orientés exactement selon les directions principales de l'ellipse d'anisotropie.

b) L'estimation correcte et à la limite, la détection, d'anisotropie géométrique n'est possible, en pratique, qu'à quatre conditions (fortement liées) devant être remplies simultanément:

- Le nombre de données est suffisant (au moins 50)
- Le facteur d'anisotropie est important (au moins 1.5)
- Une des directions utilisées dans le calcul du variogramme est près de la direction de plus grande portée.
- La fenêtre angulaire utilisée est suffisamment étroite.

#### **II.4 Conclusion**

La cartographie est un axe de recherche et d'application qui s'est modernisé avec l'avenue de nouveaux outils en technologie.

Ainsi de certaines méthodes ont été développées pour permettre une analyse et une estimation spatiale de certains paramètres hydrologiques tel que la pluie cette estimation devient nécessaire dans le cas de grandes étendues en particulier dans les zones non jaugées.

Dans notre cas, la méthode qui sera appliquée pour estimer la pluie du bassin de l'Isser est le krigeage car il semble être la méthode d'interpolation la plus intéressante, et ce parce que l'utilisateur du krigeage a le choix d'interpoler localement ou globalement.

## Chapitre III : Cartographie des pluies annuelles applique au bassin de l'Isser

### Introduction

La carte pluviométrique, fréquemment utilisée dans les études hydroclimatologiques, constitue un outil de travail pour les projeteurs. Sa réalisation exige de résoudre deux séries de problème: homogénéisation des données (utilisation des composantes principales pour tester la fiabilité des données), variographie et interpolation des données aux nœuds d'une grille.

La cartographie permet de passer d'une connaissance ponctuelle à une connaissance spatiale du phénomène étudié. A l'aval, elle permet l'estimation correcte des lames précipitées pour le calcul des bilans hydrologiques des bassins.

La cartographie des pluies (annuelles, mensuelles et maximales) sur le Nord d'Algérie a fait l'objet de plusieurs travaux, (A.N.R.H., 1993, Laborde et al 2003).

### III.1 Présentation du la région d'étude

#### III.1.1 Situation Géographique

Le bassin versant de l'Isser se situe au Centre – Nord Algérien, entre les longitudes 1°20'31'' W et 0°52'28''W et les latitudes 34°41'22'' N et 35°9'37'' N. Il se situe à l'amont du barrage de Bni Amrane et présente une forme allongée sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif / Beni Slimane) à nord-est (mer Méditerranée). Qui couvre une superficie totale de 4116 Km<sup>2</sup> soit 0,17 % de la superficie totale de l'Algérie et pour un périmètre de 416.15 km, et s'étend sur trois (03) wilayas à savoir : Médéa, Bouira et Boumerdes. Il est limité par :

- Au Nord par la Méditerranée et Nord-Ouest par les daïras de Tablat et Larbâa.
- A l'Est par la daïra de Drâa El Mizane et Sud Est par la wilaya de Bouira.
- Au Sud-Ouest par la daïra de Ksar El Boukhari et la wilaya de Médéa.
- Au Sud par la daïra d'Ain boucif.



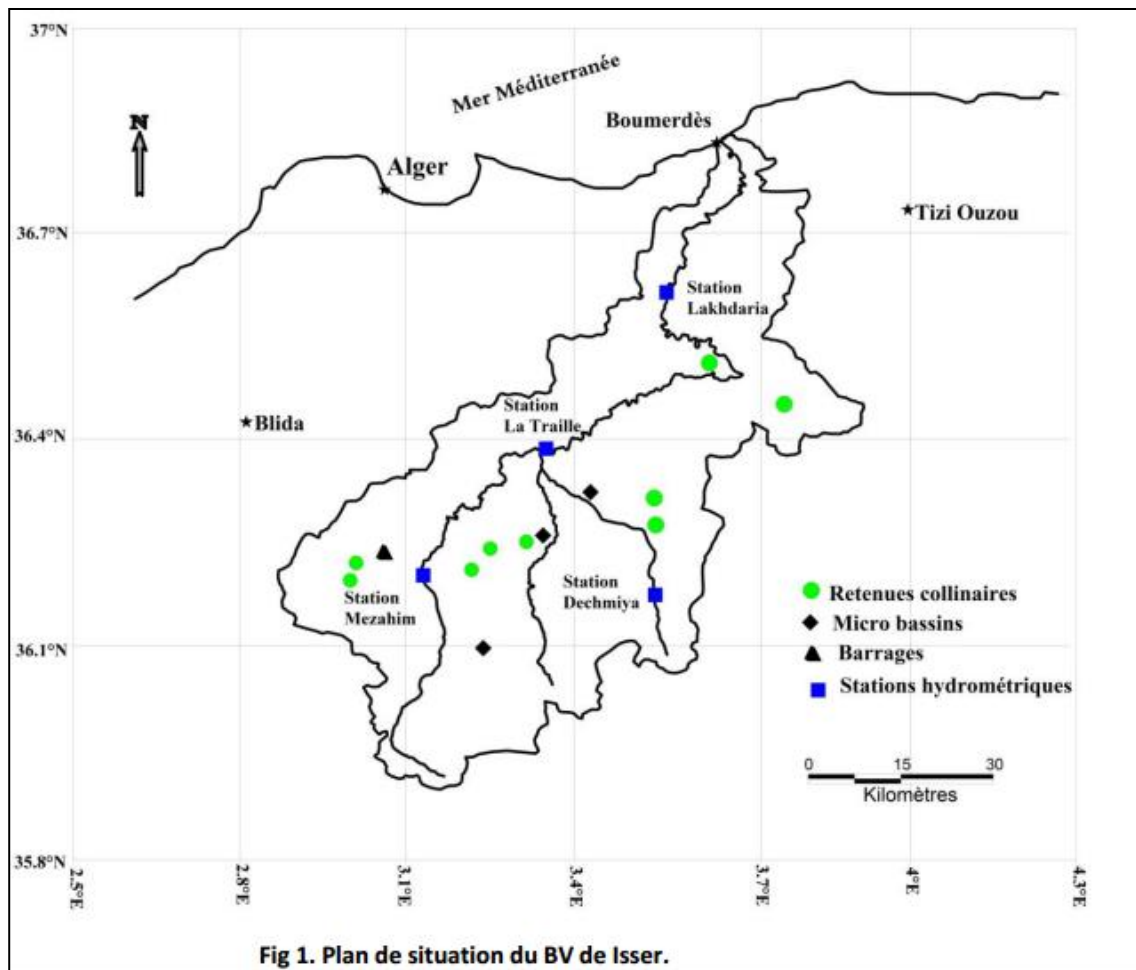


Figure III.1 : Carte de situation générale du bassin de l'Isser

### III.1.2 Géologie-Géomorphologie

**III.1.2.1 Lithologie :** Pour mieux aborder le contexte géologique, nous avons divisé le bassin en trois entités différentes en se focalisant sur une description lithologique du bassin versant afin de connaître le degré d'érodabilité et de dégradation.

**Le haut Isser :** Le haut Isser est constitué à 60% de formation marneuse et marno-calcaire appartenant au crétacé inférieur, moyen et supérieur. Les argiles et sable rouge de l'aquitainien continental occupent 13 % du bassin.

**Le moyen Isser :** La description lithologique du bas Isser et moyen Isser est extraite de la carte de géologie. Les schistes argileux, les marnes grises et schisteuses avec des couches de grés occupent 70 % du moyen Isser. Les alluvions du quaternaire continentales occupent 6,90% de la superficie totale.

**Le bas Isser :** Le bas Isser est constitué de 43.15% des formations marneuses des grés et des conglomérats, appartenant à l'oligocène marin. On y trouve des granites formant 1.93 %

de la superficie totale. Ces formations dures conglomérats et granites donnent au bas Isser, la caractéristique du moins érodable en comparaison avec le haut Isser.

### **III.1.2.2 Topographie du bassin**

**Le haut Isser :** le haut Isser dont les lignes de crête se situent entre 1200-1800 m à une altitude moyenne 843 m, 50% de la surface est comprise entre les altitudes 700- 1100 m.

L'arrête présente deux arrêtes principales orientées, Sud - Ouest et Nord -Est. L'arrête Sud-Ouest est plus élevée et passe de 1460m à Kef Lakhdher Chergui à la cote 1810 au Bjebl Dira, point ne culminant du bassin.

**Le moyen Isser :** le relief est plus au moins accentué. Il se situe entre l'altitude 900 à la station Lakhdaria à 1265m au Bjeble Fouda.

**Le bas Isser :** les altitudes du bas Isser sont comprises entre 0-1031 m sur la bordure du massif occidental du Djurdjura. Il présente une topographie accentuée.

Pour ce qui est de l'oued, il présente une pente assez marquée en amont (Oued El Mellah). En aval il prend une forme relativement rectiligne avec des pentes faibles.

## **III.4 Climatologie**

Dans ce qui suit nous présentons les paramètres météorologiques sur la base des données obtenues au niveau de la station de Chabt el Aneur qui, de par sa situation géographique, qui représente le mieux la région d'étude. Les caractéristiques de la station de Chabt el Aneur sont détaillées comme suit :

**Tableau III.1 : Caractéristiques géographiques de la station de Chabet el Aneur.**

Nom de la station	Code	Coordonnées	Altitude
CHABET EL AMEUR	<b>90512</b>	X= 588,85      Y= 371,40	Z= 260

**Source: ANRH Alger**

### **III.4.1 Pluies Mensuelles**

L'analyse des pluies mensuelles permet de connaître la répartition de la pluviométrie à l'échelle de l'année, ce qui permet de déduire les déficits d'écoulements saisonniers.

**Tableau III.2 : les pluies moyennes mensuelles à la station de Chabet El Amaur :**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Pluie annuelle (mm)
Pluie (mm)	31	48	91	120	91	103	96	67	48	17	4	6	722

Source : ANRH Alger

### III.4.2 Les températures

**Température :** Le bassin est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire. Entre le climat Tellien de montagne pluvieux et à l'amplitude thermique faible, avec des chutes de neige et le climat Tellien de plaine plus sec relativement chaud et présentant de forts écarts de température.

Les relevés mensuels moyens des températures sur une période de 20 ans est donnée par le tableau suivant :

**Tableau III.3 : Répartition des températures moyennes interannuelles (station de Chabet El Aneur).**

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Tmin (°C)	3,4	3,4	5,1	7,0	10,8	15,4	17,9	18,8	15,3	11,4	7,0	4,3
Tmax (°C)	13,2	14,6	18,0	20,2	25,9	32,0	36,1	36,4	30,0	24,8	18,8	14,1
Tmoy (°C)	8,3	9,0	11,4	13,5	18,3	23,6	27,0	27,6	22,6	18,0	13,0	9,2

Source : SMC

### III.5. Caractéristiques Hydrologiques du bassin de l'Isser

Le bassin versant de l'oued Isser et ses affluents drainent une superficie totale de 4116 Km<sup>2</sup>.

Au droit du barrage de Béni-Amrane, le bassin versant à l'exutoire présente une superficie de 3710 km<sup>2</sup>. Les sols sous-jacents sont essentiellement des schistes et des calcaires, avec un peu de grès et de conglomérats.

La pente de l'oued est relativement forte. Le lit de l'oued vers l'amont du barrage présente une pente d'environ 2,5 m/km passant à 5 m/km dans la gorge profondément incisée qui se trouve à 8 km vers l'amont. En aval du site du barrage, la pente moyenne est d'à peu près 1 m/km.

Le bassin versant est particulièrement arrosé, la pluviométrie interannuelle s'établissant autour de 700 mm et peuvent atteindre 900 pour une année humide.

Le lit du cours d'eau contient des dépôts récents de sables et de graviers ; il est protégé de manière générale par des galets grossiers dont le diamètre atteint 150 mm. Les dépôts les plus étendus se trouvaient dans la section centrale de la retenue, à l'endroit où la vallée s'élargit ; ils ont été utilisés comme matériaux de construction.

**Tableau III.4 : Caractéristiques hydromorphométrique du bassin de l'Isser**

Caractéristiques	Bassin Isser
A(Km <sup>2</sup> )	4116
P(Km)	416.15
Kc	1.816
L(Km)	185.92
Altitude maximale(m)	1802
Altitude minimale(m)	0
Altitude moyenne(m)	659.9
Ig (m /Km)	4.95
Dg(Km/Km <sup>2</sup> )	0.64
Tc(Heures)	24.4

### III.6 Etude de la pluviométrie

L'étude des précipitations est importante dans toute analyse hydrologique, puisqu'elle permet de caractériser le régime pluviométrique et son influence sur les crues, ce qui permet de mieux dimensionner les ouvrages hydrotechniques. Les données utilisées nous ont été fournies par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) et l'Agence Nationale des Ressources en Hydrauliques (ANRH).

#### III.6.1.Situation géographique des stations pluviométriques

Le bassin de l'Isser dispose d'un réseau pluviométrique assez dense, constitué par vingt (28) stations d'observations. Le tableau III.5, nous indique la position de stations qui peuvent être exploitées, la figure montre leur répartition spatiale.

Tableau III.5 : Caractéristiques des stations pluviométriques

Code	Station	Coordonnées Lambert (Km)		Altitude (m)
		XLNA	YLNA	
90512	CHABET EL AMEUR	588,85	371,40	260

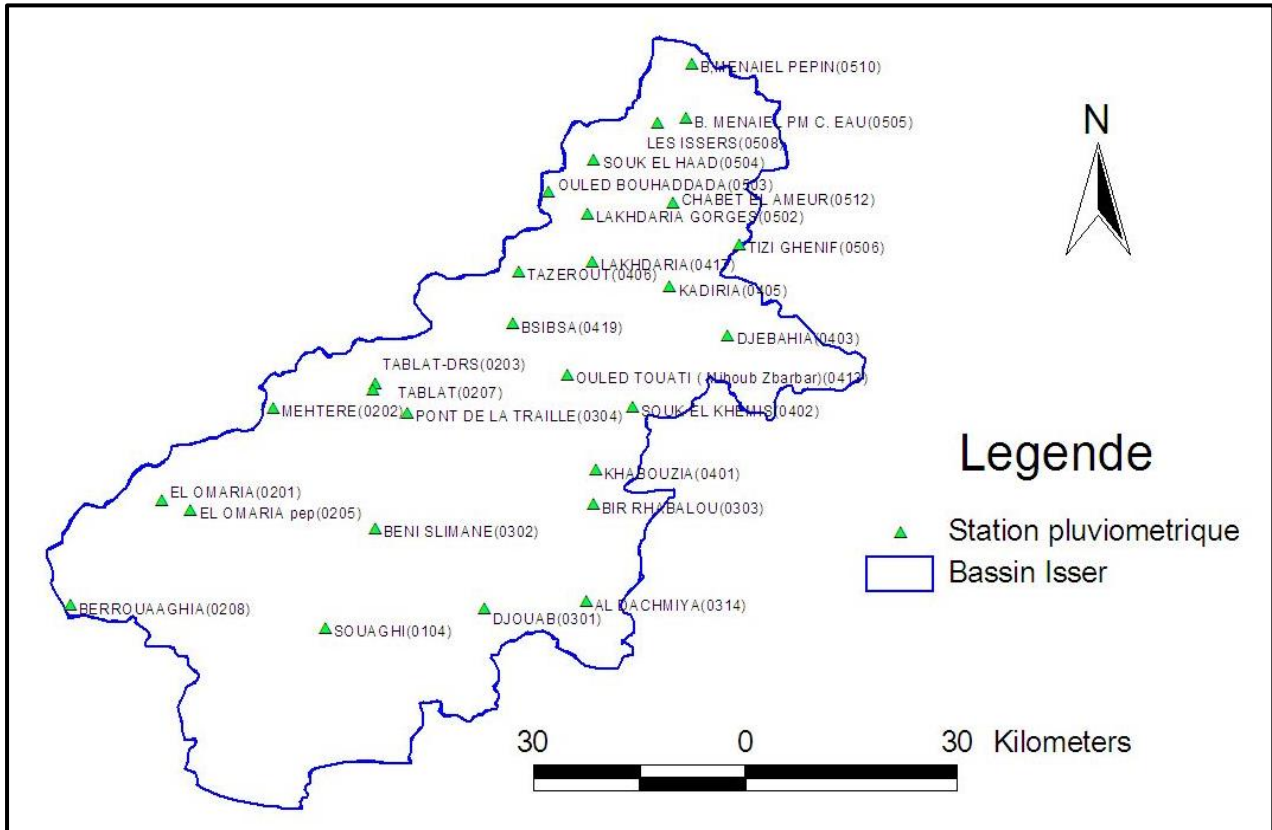


Figure III.2 : Localisation des stations pluviométriques Isser

### III 6.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss ou loi normale

Le procédé de calcul consiste à (Roche, 1964) :

- Classer les valeurs de l'échantillon par ordre croissant.
- Affecter un numéro d'ordre aux valeurs classées.
- Calculer la fréquence expérimentale (par la formule de Hazen par exemple).

-Variable réduite de gauss :  $U = \frac{X - \bar{X}}{\delta}$

-Calcul des caractéristiques empirique de loi ( $\bar{X}$  ;  $\delta$  ; Cv; CS=0).

-Calculer le coefficient de variation :  $Cv = \frac{\delta}{x}$

Le quantile de pluie pour une période de retour donnée est:

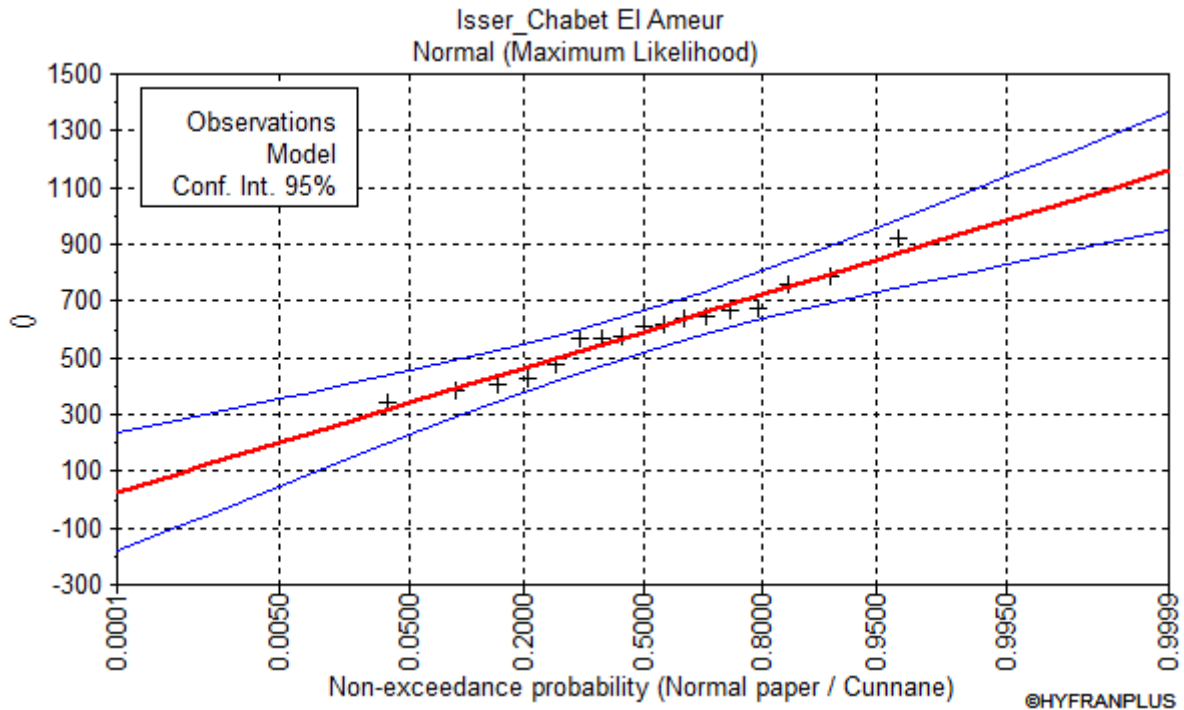
$$XP\% = \bar{X} + \delta * Up\%$$

Avec : XP%: précipitation de probabilité P%.

Up%: variable réduit de Gauss.

$\bar{X}$  : Moyenne arithmétique.

$\delta$  : Écart type



**Figure III.3 : Ajustement des pluies annuelles à la loi normale**

Le test Khi carrée est de 241, alors que le Khi carrée est de 7.82, l'ajustement est donc à considérer.

**Tableau III.6 : Quantiles des pluies annuelles (loi Normale)**

T	Q	XT	L'écart type	Intervalle de confiance (95%)	
10000	0.9999	1160	107	950	1370
2000	0.9995	1090	96	906	1280
1000	0.999	1060	91	885	1240
200	0.995	985	78.6	831	1140
100	0.99	947	72.7	804	1090
50	0.98	905	66.5	775	1040
20	0.95	843	57.7	730	956
10	0.9	788	50.5	689	887

### III.6.3 Estimation de la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin de l'Isser

Cette estimation est importante, puisqu'elle permet d'apprécier le régime hydrologique auquel est soumis le bassin.

#### a-Méthode de Thiessen

La méthode de Thiessen consiste à pondérer les résultats de chaque station en admettant que chacune d'elle représente les précipitations moyennes sur une fraction du bassin délimité de façon suivante : Les stations disponibles étant reportées sur une carte, nous traçons une série de droites formant un triangle ou on élève des médiatrices. Leurs intersections délimitant un certain nombre de polygones appelés 'surface d'influence du poste pluviométrique. La précipitation moyenne sur l'ensemble du bassin versant d'Isser est :

$$P_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot P_i}{S}$$

Avec:

$P_i$  : Précipitation moyenne inter annuelles pour chaque station en (mm).

$S_i$  : Surface d'influence de chaque station en (km<sup>2</sup>).

$S$  : Surface totale du bassin versant en (km<sup>2</sup>).

Les résultats du calcul par la méthode de Thiessen pour les pluies annuelles sont résumés dans le tableau (III.7) :

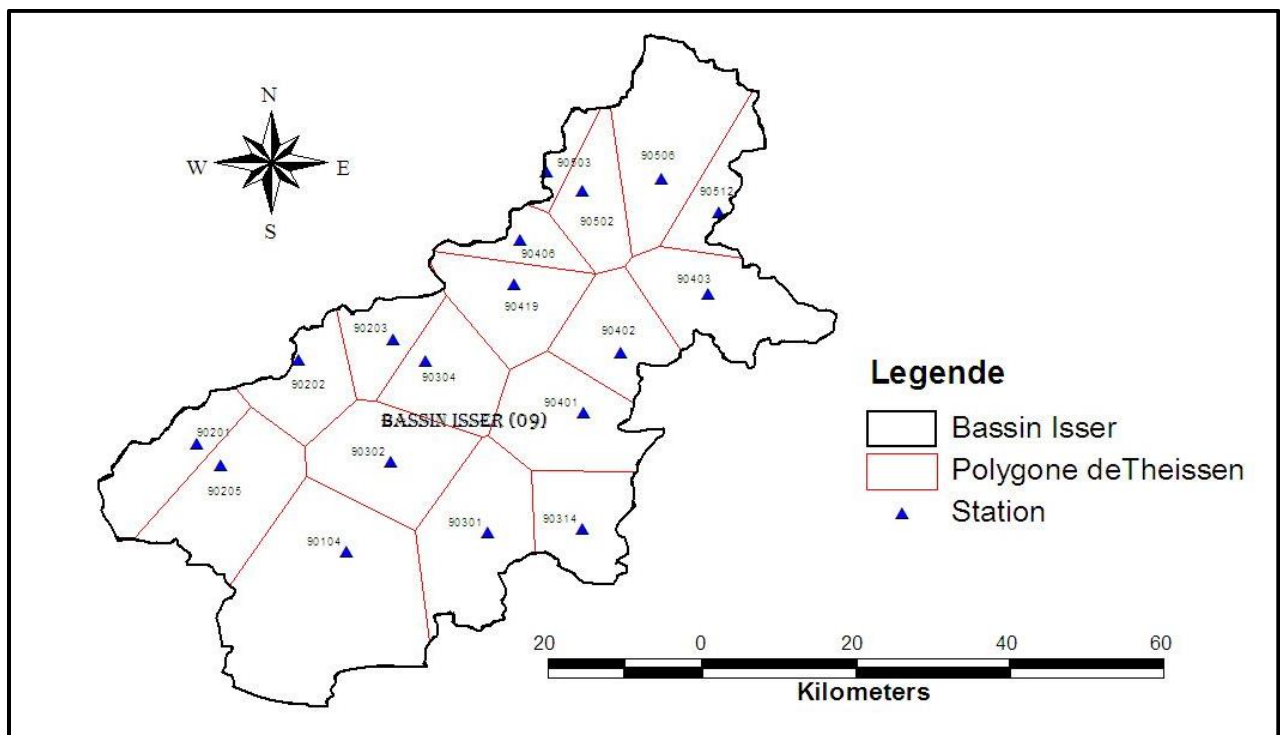


Figure III.4 : Polygone de Thiessen (Bassin d'Isser).

**Tableau III.7 : Pluie moyenne du bassin d'Isser par la méthode de Thiessen**

Code Station	Pluie Moyenne (mm)	Zone d'influence du pluviomètre (km <sup>2</sup> )
90104	355,30	662,61
90201	426,11	188,01
90202	611,01	159,84
90203	605,86	125,45
90205	343,56	295,7
90301	520,34	315,75
90302	374,348	273,95
90304	484,82	203,83
90314	416,62	188,05
90401	407,38	266,79
90402	552,50	191,96
90403	618,92	276,61
90406	805,16	91,146
90419	726,48	214,29
90502	727,90	154,83
90503	779,74	45,119
90506	743,08	114,59
90512	705,76	347,475
<b>Pluie moyenne du bassin d'Isser (mm)</b>		<b>517,04</b>

### III.6.4 Caractérisation des transports solides de la zone d'étude

L'estimation des apports solides permet de quantifier les volumes solides annuels et de prévoir la durée de vie des ouvrages de protection tels que les ouvrages et les de retenue. Cependant, on doit préciser que les volumes des apports solides dépendent de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques (érodibilité, pente) du sol, agressivité climatique, volumes liquides, etc.

#### Formule de Gravelovic :

Une formule très applicable en Algérie, cette équation prend en considération plusieurs paramètres :

$$T_0 = T_{sp} * G_{rm}$$

tel que :

$$T_{sp} = T \cdot P_{moy} \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \quad \text{Tel que} \quad \left[ T = \sqrt{\frac{t}{10}} + 1 \right]$$

$$G_{rm} = \frac{(\sqrt{P} + H_{moy})}{0,2(L + 10)}$$



Avec :

- $T_0$  : taux d'abrasion [t/Km<sup>2</sup>/an] ;
- $T_{sp}$  : le taux de la production annuel des matériaux en [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/an] ;
- $G_{rm}$  : taux de rétention des sédiments produits par le bassin ;
- $T$  : coefficient thermique ;
- $Z$  : coefficient d'érosion relative en fonction de la description du B.V,  $Z = 0.6$ ;
- $P_{moy}$  : Pluie moyenne annuelle [mm] ;
- $T$  : température moyenne annuelle [°C] ; pour notre cas  $t=20^{\circ}C$
- $P$  : périmètre du bassin versant [Km] ;
- $L$  : longueur du talweg principal [Km] ;
- $H_{moy}$  : Altitude moyenne [km].

A, N:  $T_0=493[t/Km^2/an]$

Les résultats de calcul par les différentes méthodes sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau III.8 : Calcul du transport solide (Tonnes/km<sup>2</sup>/an)**

Bassin	Gravilovic (T/km <sup>2</sup> /an)
Isser	493

**Discussion** : d'après les caractéristiques détaillées dans les tableaux précédents on voit que le taux d'abrasion moyen est de 493 T/km<sup>2</sup>/an. Vue la superficie du bassin et les intensités pluviométriques, on conclut que le bassin de l'Isser présente une forte vulnérabilité à l'érosion et aux transports solides.

### III.7 Données et Méthodologie

#### III.7.1 Constitution de l'échantillon de données

Pour les besoins de notre cartographie, nous avons constitué un échantillon de données de pluies calculées sur une période relativement longues et réparties de Façon homogène sur le bassin de l'Isser. L'échantillon de données de pluies annuelles, est constitué de 18 stations réparties de façon homogène dans le bassin, il est présenté comme suit :

Tableau III.9 : Echantillon de pluies annuelles utilisé pour la cartographie de l'Isser

Nom de la station	Code	Coordonnées		Altitude	Pluie annuelle (mm)
		X	Y		
SOUAGHI	90104	548,99	312,40	810	355,30
EL OMARIA	90201	530,20	329,20	790	426,11
MAHTERRE	90202	542,85	342,50	875	611,01
TABLAT DRS (A.N.R.H.)	90203	554,75	345,80	450	605,86
EL OMARIA Pep,	90205	533,35	327,30	658	343,56
DJOUAB	90301	566,95	315,55	825	520,34
BINI SLIMANE	90302	554,70	326,00	600	374,348
PONT DE LA TRAILLE	90304	559,15	343,00	370	484,82
DECHMYA	90314	578,50	316,35	850	416,62
KHABOUZIA	90401	579,15	334,35	720	407,38
SOUK EL KHEMIS	90402	584,00	343,40	782	552,50
DJEBAHIA	90403	594,80	353,45	520	618,92
TAZEROUT	90406	571,10	361,65	450	805,16
BSIBSA	90419	570,25	354,50	820	726,48
LAKHDARIA GORGES	90502	579,00	369,50	50	727,90
OULED BOUHADDADA	90503	574,55	372,30	425	779,74
TIZI GHENIF	90506	596,30	366,10	415	743,08
CHABET EL AMEUR	90512	588,85	371,40	260	705,76

### III.7.2 Présentation du logiciel de cartographie

Nous avons utilisé comme support le logiciel EasyKrig sous matlab, ce logiciel utilise une interface utilisateur graphique (GUI) pour simplifier l'opération.

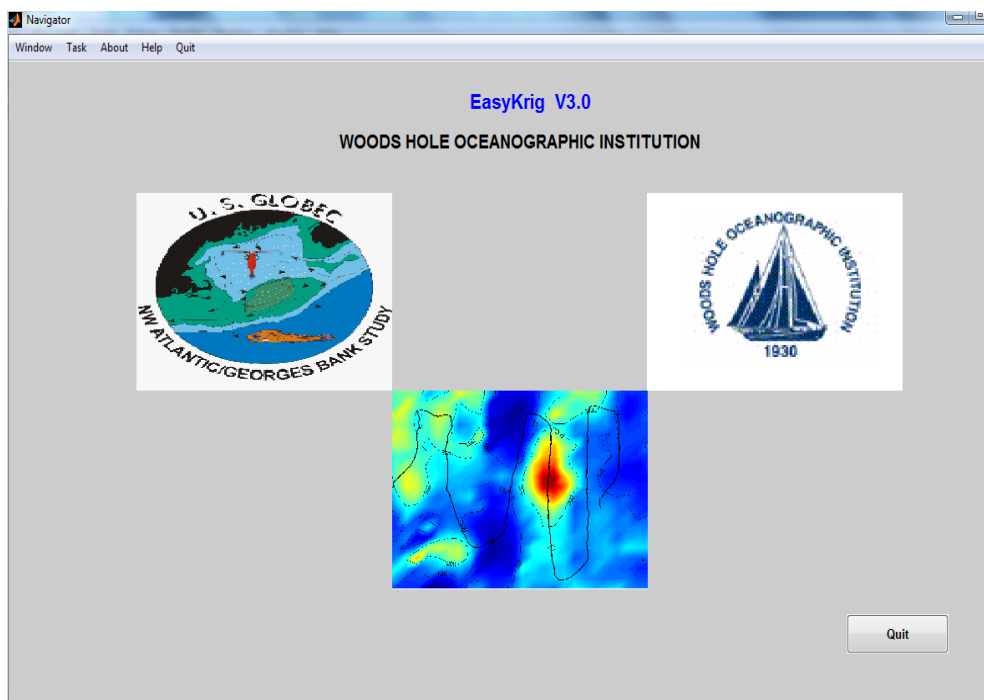
Il nécessite Matlab version R2012 ou supérieure avec ou sans boîte à outils d'optimisation et se compose de cinq composants ou étapes de traitement :

1. préparation de données,
2. calcul de variogramme,
3. krigeage,
4. visualisation

Il permet à l'utilisateur de traiter des données anisotropes, de sélectionner un modèle approprié à partir d'une liste de modèles variogrammes, ainsi qu'un choix de méthodes de krigeage, ainsi que des paramètres de krigeage associés, qui sont également des fonctionnalités communes des autres progiciels existants. L'un des principaux avantages de ce paquet de programme est que le programme minimise les exigences des utilisateurs pour "deviner" les paramètres initiaux et générer automatiquement les paramètres par défaut requis. De plus, comme il utilise une interface graphique, les modifications apportées aux paramètres de paramètres initiaux peuvent être effectuées facilement. Une autre caractéristique de ce package de programme est qu'il possède une bibliothèque d'aide en ligne intégrée qui permet à l'utilisateur d'obtenir facilement les descriptions d'utilisation des paramètres et des options de fonctionnement.

➤ **Étapes de traitement :**

La fenêtre principale du logiciel est comme suit :



**Figure III.5 : Fenêtre principale du logiciel**

Pour l'utilisation des données, la fenêtre d'appel et de traitement est comme suit :

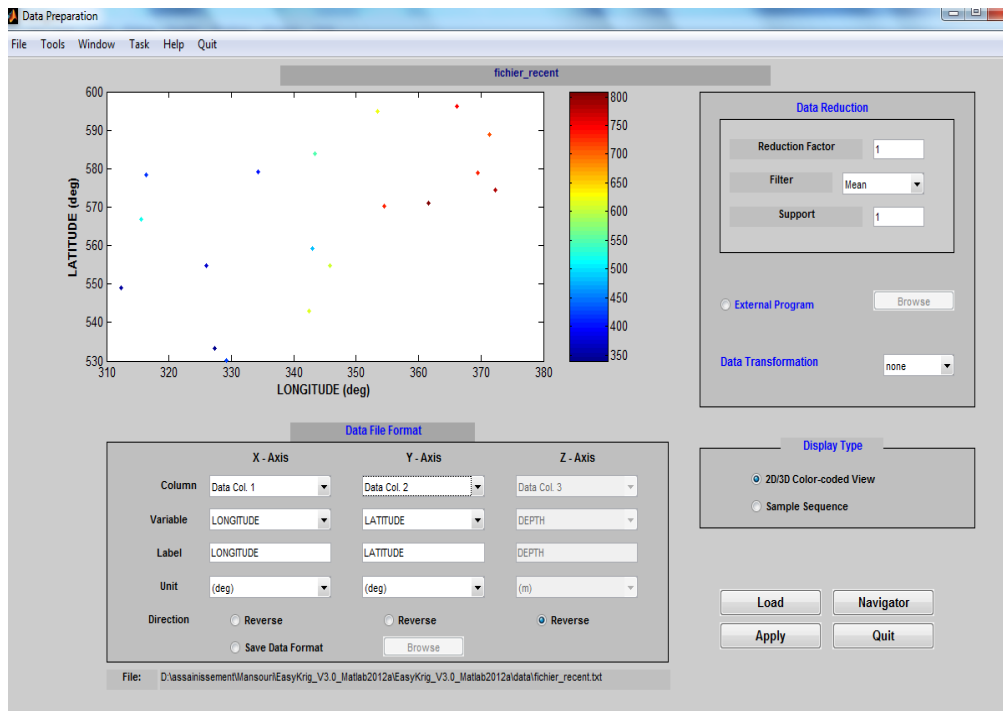


Figure III.6 : Fenêtre des données

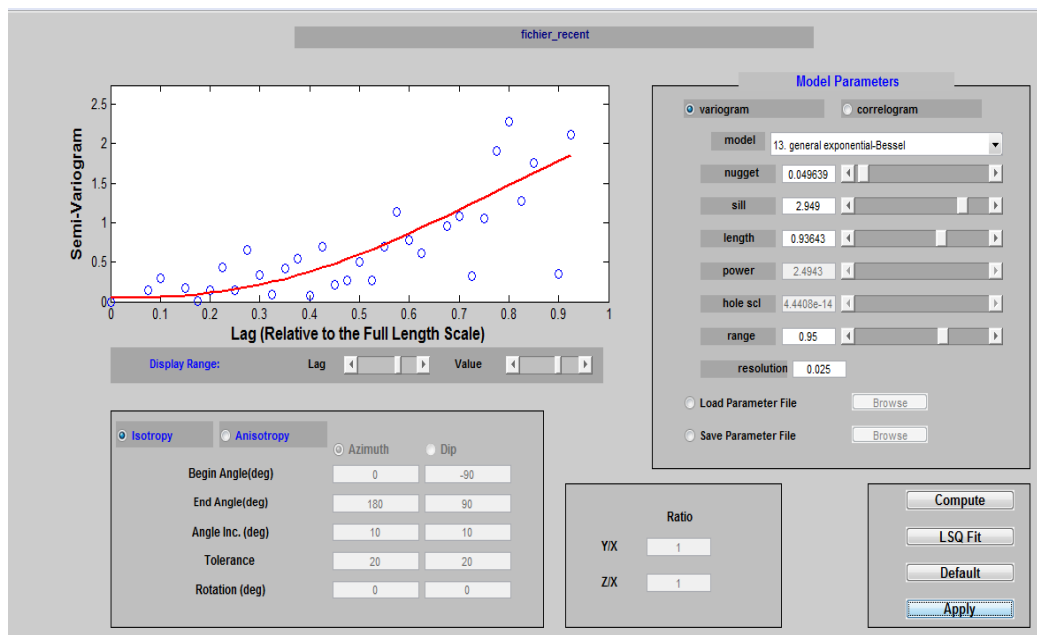


Figure III.7 : Utilisation du Variogramme

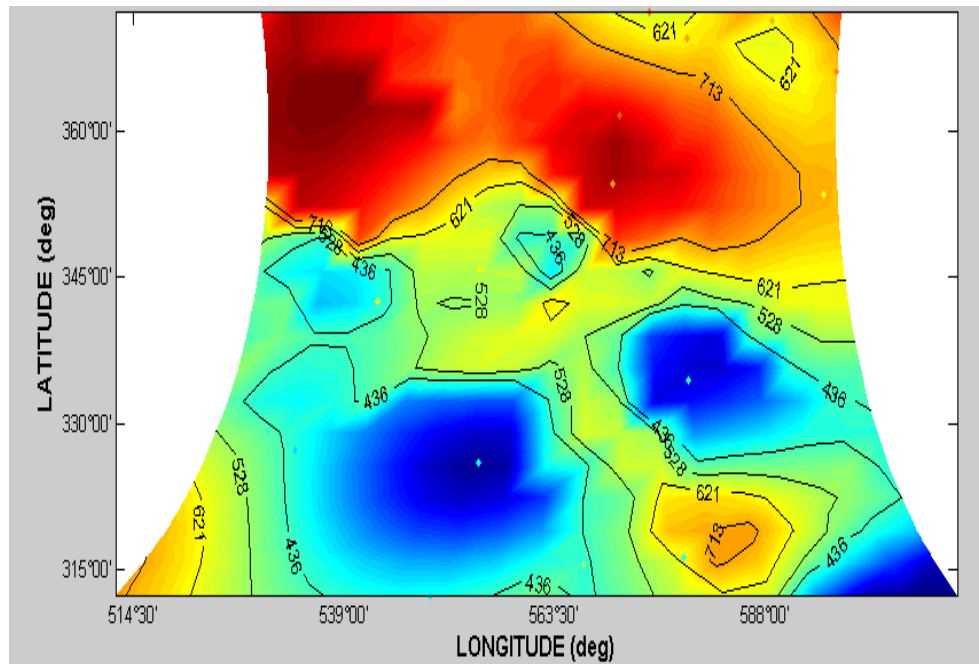


Figure III.8 : Visualisation

### III.7.3 Résultats de la cartographie des pluies :

Après introduction de données de pluies dans le logiciel, nous avons tenté d'étudier l'influence du choix du variogramme sur les résultats de la cartographie. Trois modèles ont été testés : Exponentiel, Gaussien et linéaire:

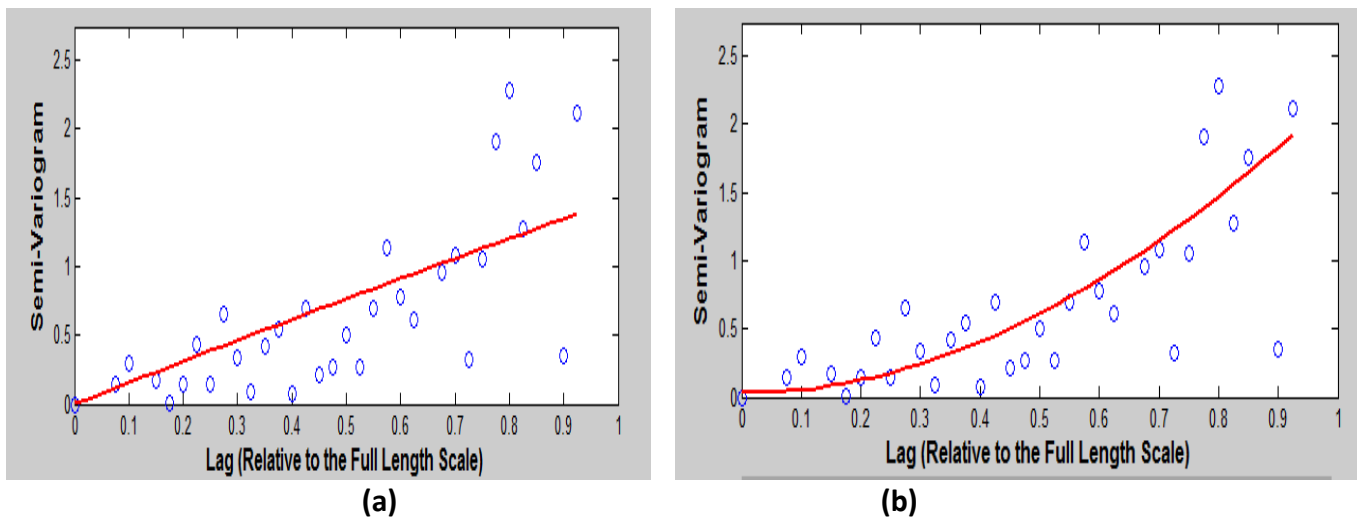
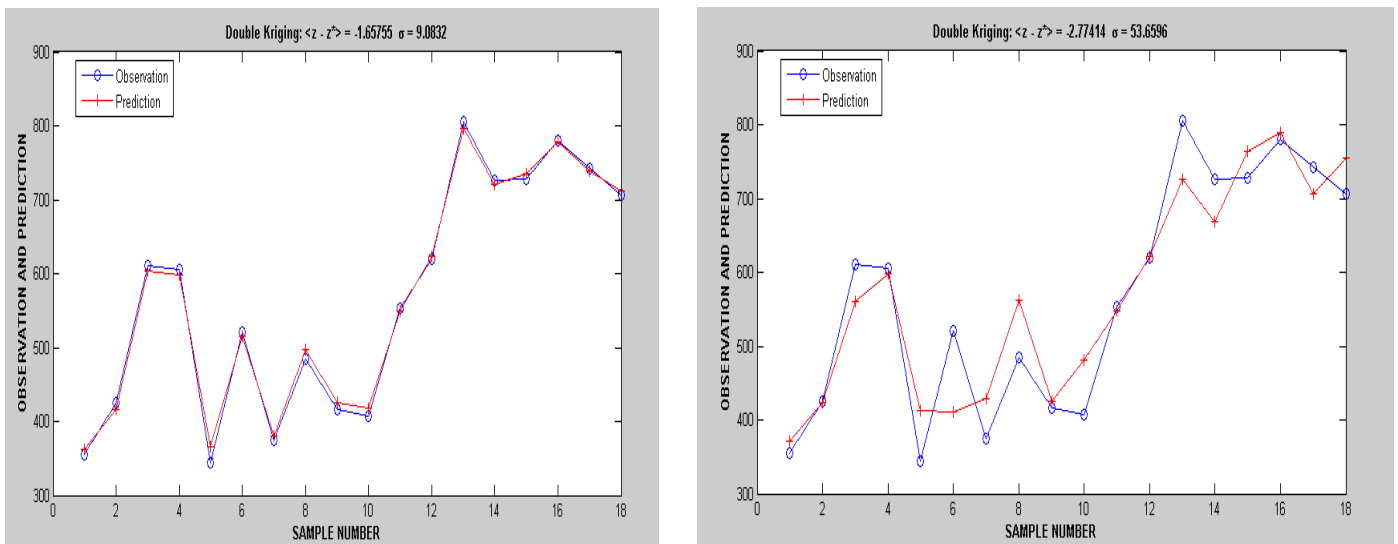


Figure III.9 : Exemple de modèles utilisés : (a) : Exponentiel, (b) : Gaussien

**III.7.3.1 Validation des resultats :**

En vue d'obtenir le modèle le plus adéquat entre les deux modèles utilisées Exponentiel et Gaussien, une validation s'impose en se basant sur les résidus ou la différence entre les données de pluies observées et calculées par le modèle, ce qui est graphiquement illustré dans les figures suivantes :



**Figure III.10 : Erreur de simulation des pluies par les differentes modeles :  
 (a) exponentiel et (b) Gaussien**

**III.7.3.2 Comparaison entre les deux modèles de simulation choisis**

**Tableau III.10 : comparaison d'erreur des modèles :**

Le modèle de variogramme	L'erreur
Exponentiel	1.65
Gaussien	2.77

**Remarque :**

En tenant compte de l'erreur minimale on opte pour le modèle d'exponentiel.

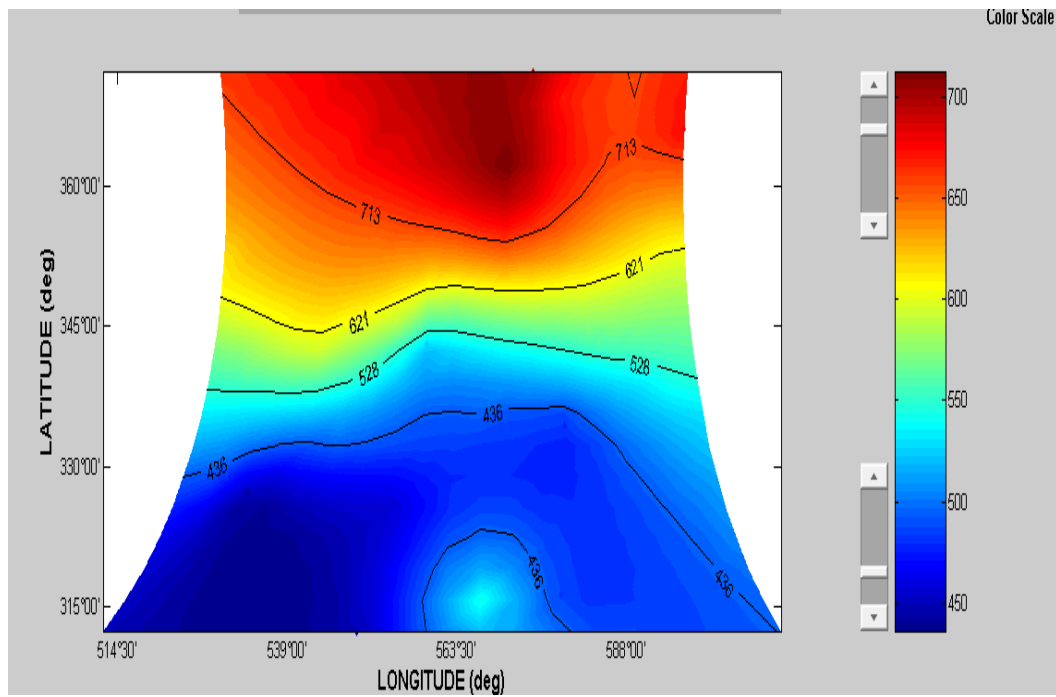


Figure III.11 : Cartographie des pluies annuelles de l'Isser

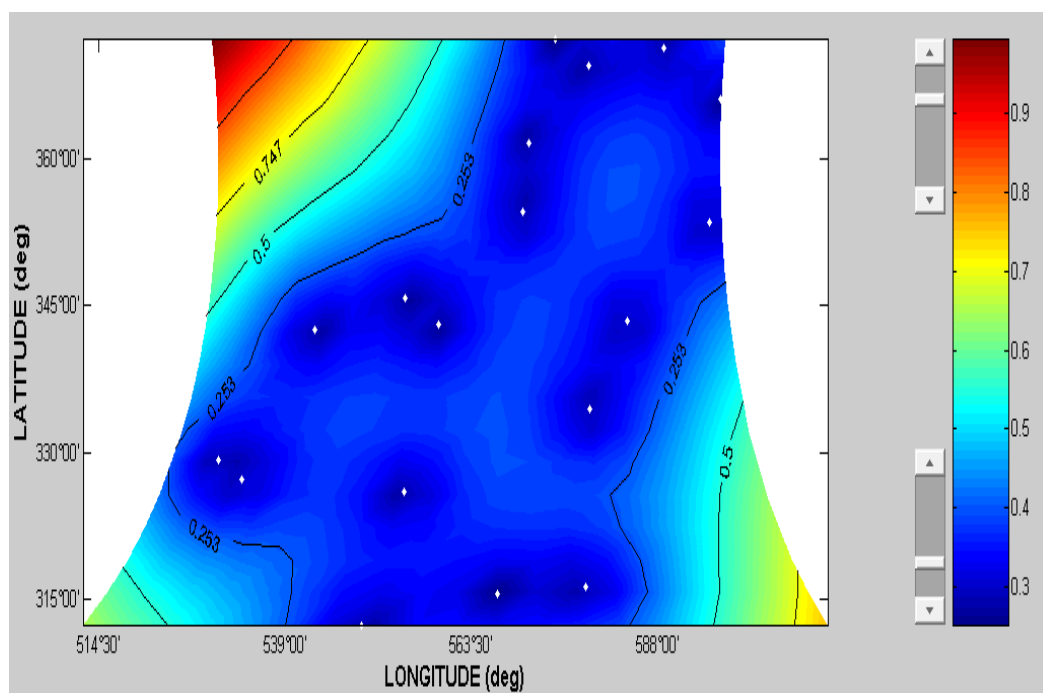


Figure III.12 : Carte d'erreurs de simulation des pluies

### **III.8 Conclusion**

La cartographie est un axe de recherche et d'application qui s'est modernisé avec l'avenue de nouveaux outils.

La méthode d'interpolation utilisée dans notre mémoire est le krigeage déjà testé dans de nombreuses applications en cartographie.

L'étape de l'analyse variographique influence sensiblement le résultat final de l'interpolation. En effet la sélection du modèle variographique est une étape cruciale, car le choix du modèle d'interpolation (linéaire, exponentiel, gaussien) conditionne la cartographie des pluies en particulier dans le cas de bassins assez étendus comme l'Isser.



---

---

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Les précipitations sont des processus variables aussi bien dans l'espace que dans le temps. Lorsque cette variabilité est caractérisée par une certaine cohérence, celle-ci définit leur structure. En hydrologie la répartition spatiale des pluies doit être abordée et estimée pour l'ingénieur afin d'effectuer un aménagement hydraulique, la cartographie des pluies est un outil pour estimer des pluies en zones non jaugées.

Dans ce mémoire, nous avons fait une étude bibliographique sur les différentes méthodes de régionalisation des pluies annuelles.

En deuxième lieu nous avons détaillé les différents modèles de cartographie des pluies, cette cartographie devient indispensable, dans le cas de zones non pourvues de stations climatologiques. En suite une présentation générale du bassin versant de l'Isser qui nous a permis de comprendre par la suite le comportement hydrologique de ce bassin.

L'objectif final de ce travail est d'avoir une méthodologie de cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'Isser par des méthodes les plus robustes. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage.

Le krigeage semble être la méthode d'interpolation la plus intéressante, et ce, pour plusieurs raisons, comme avec les méthodes déterministes, l'utilisateur du krigeage a le choix d'interpoler localement ou globalement.

Cette recherche nous conduit à d'autres réflexions, concernant la cartographie des pluies maximales, indispensables dans la prévision des crues.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

**A.N.R.H., 1993.** Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, Ministère de l'Équipement, Projet PNUD/ALG/88/021, Alger, 1 carte et sa notice de 54 p.

**AMBROISE. B ,1999.** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles.HGA.

**BENKACI. T, 2006.** Modélisation de la relation pluie-débit au pas temps journalier et mensuel par les réseaux de neurones artificiels et les systèmes neuro-flous. Thèse de doctorat ENSA- ALGER.

**BENMOSTEFA. M.A ,2012.**Thèse: Télédétection de la végétation maritime par Radiomètres Optiques Passifs : Cas du littoral Algérien.

**BENNIS. S, 2007.** Hydraulique et hydrologie ,2<sup>ème</sup> édition.

**BERNE. A, 2002 :** Précipitations méditerranéennes intenses en milieu urbain : interprétation physique et analyse statistique de mesures à fines échelles spatio-temporelles, impact de la variabilité spatiale sur la réponse de bassins versants.. Université Joseph Fourier.

**BOIVIN. P ; HACHICHA. M; JOB. J.O; LOYER. J.Y ,1989.**Article : Une méthode de cartographie de la salinité des sols conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage .

**CHOW. Ven T, 1964.** Handbokk of applied hydrology.McGraw-Hill Book Campany,Inc Toronto.

**DÉVÉRIN.Y, 2005. COURS: Cartographie, LICENCE 3ème année, UNIVERSITE DE TOULOUSE LE MIRAIL**

**FAGNAN.N ; LEFEBVRE.R ;MICHAUD.Y,2008.**Article :caractérisation hydrogéologique

**HOWARD. P et al, 2016.** le cycle de l'eau.

**LABORDE .J.P et al 2003.** Les chroniques mensuelles de pluies de bassin : un préalable à l'étude des écoulements en Algérie, Colloque International "Gestion du risque eau en pays semi-aride», Tunis.

**LABORDE, J.P, 2009.** Eléments d'hydrologie de surface. Support de cours .ECOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANIPOLIS.

**LABORDE. J.P, 2000.** Elément d'hydrologie de surface Support de cours, Université de Nice Sophia-Antipolis.

## Références bibliographiques

---

- LEBEL, T, 1984.** Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes, thèse docteur-ingénieur, USMG-INPG, Grenoble
- LEGOUT, C, 2016.** Le bassin versant, cours de master 1, Laboratoire d'étude des Transfert en Hydrologie et en Environnement, Université Joseph Fourier
- LOUAMRI, 2009.** Cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued Seybouse (nord-est algérien).
- MATHRON, G ,1965.**Les variables régionalisées et leur estimation. Edition Technip, Paris.
- MATHRON.G, 1969.** Le krigeage universel .cahier du Centre de Géomorphologie Mathématique –Ecole des Mines de Paris.
- MEBARKI.A, 2003.** Cartographie automatique des précipitations : application à l'Est algérien, Revue des Sciences et Technologie.
- MEDDI. M ; MEDDI .H ,2009.**Article : Variabilité Spatial et Temporelle de précipitation du nord-ouest de l'Algérie.
- MEDDI. M. et HUBERT. P, 2003.** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In: Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions, IAHS publication, n°278, p. 229-235.
- MEDDI. M. et HUMBERT.J, 2000 .**Étude des potentialités de l'écoulement fluvial dans le Nord de l'Algérie en vue d'une réalimentation des aquifères. In : Eaux sauvages, eaux domestiquées, Hommage à L. DAVY, Publications de l'Université de Provence, p. 177 190.
- MEDDI.M ; TALIA.A et MARTIN .C, 2009.** Article : Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie).
- MOLINIE. G, 2004.** Mesure des précipitations.
- MUSY. A, 2005.** Cours d'Hydrologie Générale, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- OBLED. C, 1982.** Analyse objective et techniques de cartographie des champs de précipitation :Une comparaison objective.
- OUSSEDIK.A et al, 2003.** Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification, Sécheresse
- RICHE.M ,1964.**Etudes des nappes d'inféro-flux des rivières de la bordure ouest de l'Air, compagnie 1964, mission ORSTOM-Niger.
- ROCHE. M ,1971.** Les divers types de modèles déterministes .Les Houille Blanche, n °2 ,111-129.

## Références bibliographiques

---

**ROCHE. P.A, 1963**, Hydrologie de surface, OFFICE DE LA RECHERCHE ET TECHNIQUE OUTRE-MER-(PARIS), GAUTHIER-VILLARS EDITEUR.

**TAIBI. S ,2011**. Thèse de magister : Analyse du régime climatique au nord de l'Algérie.

**TOUAZLM. et LABORDE.J-P, 2000**, Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol 13.