

***Apport de la cartographie numérique sur  
l'étude de l'influence des précipitations sur  
la production du blé dur***

**Réalisé par : M. BACHIR Hakim**

Directeur : M. Semar A. Maître de conférences (ENSA)

Co-directeur : M. Mouhouche B. Maître de conférences (ENSA)

Année : 2011

Jury: Président : M. Chabaca N. Maître de conférences (ENSA) Examineurs : M. Mesbah M.  
Professeur (USTHB) M. Oldache E. H. Maître de conférences (ENSA)



# Table des matières

Dédicace . . .	5
REMERCIEMENT . . .	6
Liste des abréviations . . .	7
RESUME . . .	8
ABSTRACT . . .	9
صغلم . . .	10
Introduction Générale . . .	11
Première Partie : Synthèse Bibliographique . . .	13
<b>CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE QUELQUES PARAMÈTRES CLIMATIQUES . . .</b>	<b>13</b>
Introduction . . .	13
I.1. Les précipitations . . .	14
I.2. Température de l'air . . .	21
I.3. Humidité atmosphérique . . .	21
I.4. Concept de l'évapotranspiration . . .	22
<b>CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE QUELQUES ELEMENTS DE STATISTIQUES ET DE GÉOSTATISTIQUES . . .</b>	<b>23</b>
Introduction . . .	23
II.1 Approche statistique . . .	24
II.2. Bases conceptuelles de la géostatistique . . .	28
II.3. krigage . . .	32
<b>CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE et SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (S.I.G.) . . .</b>	<b>33</b>
Introduction . . .	33
III.1. La cartographie . . .	33
III.2. Systèmes d'information géographique (S.I.G) . . .	34
<b>CHAPITRE IV : ZONAGE AGROPEDOCLIMATIQUE ET INCIDENCE DES PARAMETRES CLIMATIQUES SUR LA CULTURE DU BLÉ DUR . . .</b>	<b>38</b>
Introduction . . .	38
IV. 1. Le blé en Algérie . . .	38
IV.2. Répartition des zones céréalières en Algérie . . .	40
IV.3. Incidences des paramètres climatiques sur le blé dur . . .	42
IV.4. Rôle de l'eau . . .	44
IV.5. Périodes exigeantes en eau chez le blé . . .	45
Deuxième Partie : Matériels et Méthodes . . .	46
<b>CHAPITRE V : RÉGION D'ÉTUDE ET SON MILIEU NATUREL . . .</b>	<b>46</b>
Introduction . . .	46
V.1. Choix de la région d'étude . . .	46
V.2. Situation géographique et limites naturelles . . .	46
V.3. Morphologie du relief . . .	47
V.4. Les sols . . .	49
V.5. Hydrologie de la région . . .	50

<b>CHAPITRE VI: APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE . . .</b>	<b>51</b>
<b>Introduction . . .</b>	<b>51</b>
<b>VI.1. Prospection et recueil des données . . .</b>	<b>52</b>
<b>VI.2. Démarche adoptée pour la cartographie des précipitations . . .</b>	<b>56</b>
<b>VI.3. Carte des sols . . .</b>	<b>58</b>
<b>VI.4. Carte des pentes . . .</b>	<b>58</b>
<b>VI.5. Carte de la nouvelle aire de production de blé dur . . .</b>	<b>59</b>
<b>VI.6. Vision globale sur les outils utilisés . . .</b>	<b>59</b>
<b>VI.7. Résumé des étapes retenues . . .</b>	<b>60</b>
<b>Troisième Partie Résultats et Discussion . . .</b>	<b>62</b>
<b>CHAPITRE VII : RESULTATS ET DISCUSSIONS . . .</b>	<b>62</b>
<b>Introduction . . .</b>	<b>62</b>
<b>VII.1. Etude des données de précipitations . . .</b>	<b>62</b>
<b>VII. 2 Analyse par régression multiple . . .</b>	<b>68</b>
<b>VII.3. Cartographie numérique des précipitations . . .</b>	<b>73</b>
<b>VII.4. Interprétation des cartes des précipitations et impacts . . .</b>	<b>77</b>
<b>CONCLUSION GENERALE . . .</b>	<b>91</b>
<b>Références bibliographiques . . .</b>	<b>93</b>
<b>Annexes . . .</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXE 1 : TABLEAU DES DONNEES . . .</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXE 2 . . .</b>	<b>98</b>
<b>1 Résidus des précipitations . . .</b>	<b>99</b>
<b>ANNEX 3 . . .</b>	<b>102</b>
<b>ANNEXE 3 (SUITE1) . . .</b>	<b>102</b>
<b>ANNEXE 3 (SUITE2) . . .</b>	<b>103</b>
<b>ANNEXE 3 (SUITE3) . . .</b>	<b>104</b>

## Dédicace

*A la mémoire de mon père .A ma mère. A mes frères et sœurs et toute la grande famille;.A ma femme;.A mes amis (es) et a ceux qui m'aiment*

## REMERCIEMENT

En premier lieu je remercie mon Dieu, qui m'a donné la santé, la force et la volonté pour achever cette étude.

*Mes remerciements s'adressent aussi à:*

- *Monsieur **A. SEMAR** , d'avoir accepté la direction de mes travaux de thèse. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour le temps qu'il a consacré à l'encadrement de cette étude et pour les directives recommandations qui m'ont guidés pour la réalisation de cette présente étude.*
- *Monsieur **B. MOUHOUCHE** , d'avoir accepté de prendre en charge mon encadrement en tant que co-directeur de thèse avec beaucoup de sympathie et de bonne humeur. Son aide et conseils ont été précieux pour moi pour réaliser cette étude.*
- *Monsieur **N. CHABACA** , pour avoir gentiment accepté de présider le jury sans oublier Messieurs **M. MESBAH** et **E. H. OLDACHE**, Examineurs qui ont accepté de lire et d'évaluer cette thèse .*
- *tous les enseignants de l'hydraulique agricole qui ont contribué à ma formation ;*

*tous les cadres de **l'I.N.S.I.D** et en particulier M **HABILA** Directeur Général, les cadres travaillant au département Agrométéorologie **C. NEGRI**, chef de département, **S. MALLOU** et **H. MESSOUS**, qui, m'ont aidés et soutenus moralement.*

***A. KELLOU** , Technicien supérieur à l'INSID qui m'a aidé dans la réalisation de quelques cartes. Sans oublier madame **N. DEKKICHE** chef de service à l'ITGC et **S.HEDDAM** Maître assistant à l'université de SKIKDA qui m'ont aussi aidé. Et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*

***L'O.N.M** et **L'A.N.R.H** qui ont mis à ma disposition les données climatiques.*

---

## Liste des abréviations

- % : pourcent.
- °C : degrés Celsius.
- **A.E.P** : Alimentation en Eau Potable.
- **A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydriques.
- **ACP** : Analyse en Composantes Principales.
- **Alt** : Altitude.
- **AURELHY** : Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie.
- **C.I.C** : Conseil International des Céréales.
- **D.H.A** : Direction de l'Hydraulique Agricole.
- **E** : Erreurs.
- **E.N.SA** : Ecole Nationale Supérieure de l'Agriculture.
- **ETP** : Evapotranspiration potentielle.
- **ha** : Hectare.
- **I.G.F** : Indicatif Goodness of Fit.
- **I.N.C.T** : Institut National de la cartographie et de la Télédétection.
- **INSID** : Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage.
- **Lat** : Latitude.
- **Long** : Longitude.
- **M.A.D.R** : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- **M.N.T** : Modèle Numérique de Terrain.
- **N.O.A.A** : National Oceanic Atmospheric Administration.
- **P** : Précipitation.
- **q** : Quintaux.
- **q/ha** : Quintaux par hectare.
- **R** : coefficient de corrélation.
- **S.I.G** : Système d'Information Géographique.

## **RESUME**

L'estimation des Précipitations à l'échelle mensuelle et annuelle, est basée sur des régressions multiples. Cette estimation est réalisée en tenant compte de la longitude, la latitude, et l'altitude.

A l'aide de l'approche géostatistique et le S.I.G, différentes cartes de précipitations ont été réalisées à l'échelle mensuelle et annuelle des hautes plaines telliennes de l'Est de l'Algérie. La cartographie de cette variable nous a permis de détecter les périodes qui coïncident avec les stades les plus sensibles au stress hydrique et de déterminé les zones potentielles pour la production du blé dur dans la région d'étude.

**Les mots clés :**

Blé dur – Cartographie numérique – précipitation – S.I.G. – Géostatistique – Régressions multiple –Hautes plaines de l'Est – Zone potentielle

## ABSTRACT

The estimation of rainfall at monthly and yearly, is based on multiple regressions. This estimate is made taking into account the longitude, latitude, and altitude.

Using the geostatistical approach and GIS, different precipitation maps were made at monthly and annual in the Tellian high plains of eastern Algeria. The mapping of this variable allowed us to detect periods that coincide with the stages most sensitive to drought stress and identified potential areas for the production of durum wheat in the study area.

Keywords :

Durum wheat – Numeric cartography – G.I.S. – Geostatistic – Precipitations – Multiple Regressions – High Tellian full of eastern Algeria.–.Ppotential ranges aréa.

## ص خ لم

يُعمد تقدير هطول كميات الأمطار شهريا و سنويا على التراجع المتعدد . يحقق هذا التقدير مع مراعاة خطوط الطول والعرض والارتفاع .

باستخدام الوسيلة الجيوإحصائية ونظام الإعلام الجغرافي، فمننا بإيجاز خرائط لعامل التساقطات شهريا و سنويا لمنطقة الهضاب العليا لتلال الشرق الجزائري هذه العملية مكنتنا من معرفة المراحل التي للإجهاد المائي كذلك نحين المواطن ذات القدرات لإنتاج القمح الصلب بتصادف مع المراحل الحساسة

الكلمات المفتاحية :

الأمطار - نظام الإعلام الجغرافي - الجيوإحصاء - الخرائطية الرقمية - القمح الصلب  
الهضاب العليا لتلال الشرق الجزائري - المواطن ذات القدرات - التراجع المتعدد

---

# Introduction Générale

L'agriculture algérienne est en crise, à ce jour, elle n'arrive pas à répondre aux besoins nationaux pour assurer les revenus aux agriculteurs, créer des emplois, préserver les ressources naturelles et réduire les recettes d'importation.

En Algérie, la culture du blé dur (*Triticum durum Desf*) est essentiellement pluviale. Elle est par conséquent soumise à des régimes pluviométriques très variables, souvent faibles, et présentant des distributions aléatoires qui sont rarement en adéquation avec les besoins de la plante (Baldy, 1992). Ceci se traduit souvent par des déficits hydriques qui peuvent s'établir à n'importe quel moment durant le cycle végétatif, compromettant ainsi sérieusement le rendement.

Le blé dur qui est l'aliment de base de la majeure partie de la population algérienne, semble subir les plus grands dommages de ce désagrément météorologique qu'est la sécheresse, ce qui se traduit par des importations massives, en raison des besoins croissants de la population. Aussi, La stratégie de la mise en valeur et de la gestion financière des bassins versants pourrait être analysée à la lumière des conditions climatiques plus viables. Le dilemme réside dans le fait que l'intensification et la spécialisation des systèmes de production augmentent l'adaptation des entreprises agricoles aux marchés à court terme. Ces mêmes stratégies peuvent cependant réduire leur capacité d'adaptation à long terme sous un climat plus variable (Domingues Ramos, 2002).

Une nouvelle vision du développement agricole et la mutation de l'agriculture vers un modèle plus productif, sécurisant et durable est devenue une question décisive. En effet, le facteur eau constitue un élément essentiel dans le développement agricole et l'augmentation de la production, basés sur l'extension du réseau d'irrigation et la gestion efficace et efficiente de l'eau. Ainsi, la céréaliculture pluviale sera limitée au niveau des zones les plus appropriées.

D'une façon générale, les variables aléatoires climatiques constituent des contraintes pouvant affecter soit directement ou indirectement la performance de l'agriculture. Elles limitent par leurs natures les interventions des décideurs que ce soit sur le plan macroéconomique ou micro-économique. En effet, ces variables aléatoires peuvent entraîner un risque important lorsqu'il s'agit d'élaborer une stratégie dont la réalisation des objectifs dépend du comportement des conditions climatiques. D'où l'idée d'étudier et de comprendre le processus de ces variables. En d'autres termes, l'étude du comportement passé se basant sur des enregistrements chronologiques de ces variables pourrait nous fournir un certain éclaircissement sur le comportement futur de ces dernières. Par conséquent aider les décideurs à élaborer leurs stratégies en leur offrant une possibilité de prévoir le risque en partie et par conséquent la réduction des effets du climat sur l'agriculture, ou bien de faire ressortir des nouvelles aires agricoles selon le nouveau contexte climatique régnant.

Cependant, nous estimons intéressant et utile de trouver de relations liant le paramètre précipitations liquide aux facteurs relatif au relief et à la situation géographique pour mieux expliquer la répartition spatiale des précipitations à travers la cartographie numérique. Ces relations permettent d'estimer au mieux en tout point de l'espace, la pluviométrie, en se

basant sur les données fournies par les mesures classiques. Ainsi nous déterminerons les espaces favorables pour la mise en place du blé dur.

Deux approches sont largement utilisées pour l'estimation spatiale de la pluie :

1/L'approche basée sur les relations statistiques entre les précipitations et les caractéristiques de relief (l'altitude, latitude, longitude, l'exposition, l'effet de la continentalité...);

2/ l'approche géostatistique (krigeage) après avoir identifié la structure spatiale à partir des valeurs mesurées aux postes pluviométriques ;

L'un de nos objectifs est cartographier la variable précipitation de la région d'étude sur l'échelle annuelle et mensuelle, et d'utiliser ces cartes de pluie comme support pour détermination de la zone a potentiel de production de blé dur en pluviale.

La démarche optée dans la structuration de notre mémoire d'étude, correspond à partager le travail en trois principales parties à savoir :

- La première partie : synthèse bibliographique,comportant trois chapitres, cette partie consiste à présenter un rappel théorique des mécanismes de formation des précipitations, quelques caractéristiques du climat méditerranéen et celle des régions semi arides. Il sera souligné une description de l'approche statistique et cartographique ;
- La deuxième partie : matériels et méthode, comportant deux chapitres portant sur la présentation de la zone d'étude, les stations d'étude, les données climatiques utilisées ainsi que les méthodes et outils utilisés ;
- Enfin, la dernière partie : résultats et discussions, comportant un chapitres, cette partie se focalise sur l'interprétation des résultats obtenus.

# PremièrePartie : Synthèse Bibliographique

## CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE QUELQUES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

### Introduction

---

Dans ce chapitre nous essayerons de montrer l'importance relative de quelques facteurs du climat, et quelques caractéristiques du climat méditerranéen et celles des régions semi arides.

Sous l'action de l'énergie solaire, l'eau rentre dans un mouvement permanent, s'évapore et retombe sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Elle ruisselle sur les continents, s'infiltré dans les sols, s'absorbe par les végétaux, rejoint les nappes souterraines et les cours d'eau, et enfin rejoint les océans qui présentent une immense surface d'évaporation. Cette eau se renouvelle sans cesse dans la nature suivant un cycle bien organisé (figure I.1).

L'importance de l'eau sur la Terre est considérable. Parmi les trois états de l'eau (gazeux, liquide, solide), on peut dire que seul l'état liquide est primordial pour la plante. En effet, c'est le seul qui permette le développement des processus vitaux, et cette eau est liée directement à d'autres paramètres climatiques qui la conditionne.

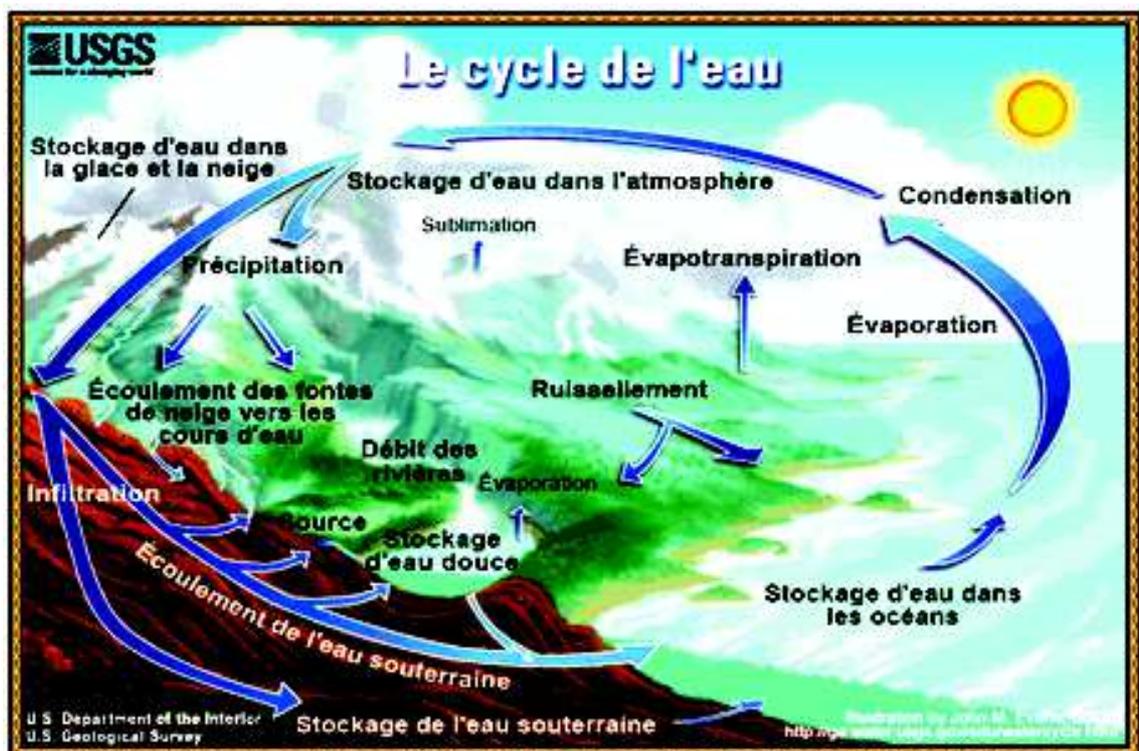


Figure I.1 : Cycle de l'eau

Source: John M, USGS. [www.ga.water.usgs.gov](http://www.ga.water.usgs.gov)

## I.1. Les précipitations

Les précipitations sont le facteur essentiel des régimes hydrologiques, puisqu'elles constituent la matière première des débits des cours d'eau (Roche, 1963).

Peguy, (1970) a défini deux ordres de faits distincts dans la présentation des précipitations. D'une part, la condensation est le fait pour la vapeur d'eau de passer à l'état liquide, sous forme de très solides paillettes de glace en suspension. D'autre part, la précipitation atmosphérique est le fait pour ces particules en suspension d'atteindre des tailles telles que leur chute dans l'air ambiant soit sensible et qu'elles atteignent en définitive le sol.

Les précipitations sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie, averse et bruine) que sous forme solide (neige et grêle) et les précipitations déposées (rosée, gelée blanche,...etc.). Elles sont le résultat d'un changement thermique ou atmosphérique. Elles constituent la principale entrée des grands systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. A l'échelle mondiale, on peut classer les précipitations en plusieurs régimes pluviométriques. Ces régimes sont définis à partir des précipitations moyennes annuelles ou moyennes mensuelles. Les précipitations sont l'un des paramètres climatiques 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 (nationale, régionale, locale,...etc.). 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 (Musy, 2005).

### **I.1.1. Types des précipitations**

Sur la base du phénomène météorologique qui donne naissance aux précipitations, ces dernières peuvent être divisées en trois principales classes (Domingues Ramos, 2002) :

- les précipitations convectives ;
- les précipitations orographiques et ;
- les [précipitations frontales](#) ou cycloniques.

#### **I.1.1.1. Précipitations convectives**

L'ascendance de particules d'air humide lors du réchauffement de la surface du sol est à l'origine des phénomènes météorologiques de type convectif. En effet, le flux de chaleur solaire qui déclenche la convection thermique et l'ascendance des particules dans une atmosphère instable peut provoquer la saturation de l'air et donner naissance à des cellules convectives, éléments de base des systèmes orageux.

#### **I.1.1.2. Précipitations orographiques**

Les particules d'air s'élevant lors de la rencontre d'un relief subissent un refroidissement dû à leur détente et peuvent atteindre le seuil de saturation. Un nuage se forme alors sur le versant du relief et des précipitations peuvent se déclencher. Bien que ce mécanisme d'ascendance soit plus marqué auprès de hautes chaînes montagneuses, l'effet orographique peut également être observé au-dessus de reliefs à altitudes inférieures à 500 m (Domingues Ramos, 2002).

#### **I.1.1.3. Précipitations frontales**

Les précipitations de type frontal sont engendrées par la rencontre de masses d'air d'origine et de propriétés thermiques et hydriques différentes. Dans une perturbation, l'air chaud est soulevé par l'air froid et les nuages se forment le long des fronts (front chaud ou front froid).

Dans le cas de fronts chauds, les nuages sont plus étendus et les précipitations sont généralement plus faibles. Le front froid est associé à des nuages avec un développement vertical plus marqué et des précipitations souvent plus intenses. On notera également que dans les perturbations frontales, la partie stratiforme peut entourer la zone convective ou occuper la périphérie de la masse nuageuse, en fonction du déplacement de l'ensemble du système (Roux, 1991).

### **I.1.2. Mesure et analyse des précipitations**

De manière générale, l'analyse des précipitations en hydrologie s'est développée autour de l'analyse des mesures, par contraste avec l'analyse des processus générateurs que l'on a suivi en météorologie (Bertrand-krajewski *et al*, 2000). La nécessité de prendre en compte la variabilité temporelle et spatiale des données et les éventuelles erreurs et limitations des échantillons disponibles ont contribué à choisir une approche stochastique de la modélisation des précipitations dans sa dimension spatio-temporelle.

L'approche stochastique considère le champ pluvieux comme une réalisation d'un processus aléatoire et la modélisation des champs cherche à reproduire le phénomène, en respectant les propriétés statistiques et géométriques observées. Dans ce contexte, plusieurs méthodes ont été mises en place, selon le type de données disponibles et l'application envisagée.

### **1.1.2.1. Mesure des précipitations**

Il existe deux catégories principales d'appareils de mesure des précipitations à savoir les pluviomètres et les pluviographes. Les pluviomètres indiquent la hauteur d'eau totale précipitée, en mm ( $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$ ), sur des durées généralement égales à 24 heures. Les pluviographes permettent de déterminer le cumul de la hauteur de pluie précipitée au cours du temps, et donc de déterminer l'intensité de la pluie, en mm/h, sur des pas de temps courts de l'ordre de 1 à 6 minutes en général, les pas de temps étant fixes ou variables.

### **1.1.2.2. Variabilité spatiale de la pluie et densité de points de mesures**

Pour des régions où les bassins versants sont étendus (plus de quelques dizaines d'hectares), il est nécessaire de disposer de plusieurs pluviomètres et/ou pluviographes pour obtenir une incertitude acceptable sur les lames d'eau précipitées, en raison de la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes pluvieux. En effet, la pluie n'est pas homogène sur toute la surface, elle varie dans le temps et se déplace. Ces phénomènes jouent un rôle important dans l'estimation des débits et des volumes ruisselés. De nombreuses études ont été réalisées sur cette question de fixer une densité idéale de pluviographes : cette densité dépend des objectifs fixés (que veut-on connaître ?), du pas de temps d'acquisition des données et de la taille du bassin versant. Dans tous les cas, il faut tenir compte des particularités locales : relief, microclimat, vents dominants, urbanisation, etc. (Bertrand-Krajewski et al. 2000)

Choisnel et Seguin (1986) proposent des normes d'installation des stations météorologiques pour utilisation agricole ils proposent une densité d'une station par 10 Km en plaines et autour de d'une station par 1 km en zone accidentée.

### **1.1.2.3. Facteurs de variation des précipitations**

Les précipitations varient considérablement dans l'espace et dans le temps en fonction de plusieurs facteurs du milieu, c'est pour cette raison qu'il faut un maximum d'informations pour que cet élément soit significativement représenté ou cartographié dans l'espace.

#### **1.1.2.3.1. Effet du relief et de l'exposition**

Les systèmes de précipitations convectifs se développent généralement à partir d'une situation d'instabilité convective conditionnelle. Dans ce cas, c'est l'humidité qui est en partie le moteur de la convection : la condensation accélère le réchauffement de la masse d'air et entretient les ascendances, entraînant derrière elle la condensation d'autres parcelles d'air. Dans les régions méditerranéennes, la mer réchauffée en l'été, est le réservoir énergétique de la convection d'automne. D'autre part, ce type d'instabilité requiert un mécanisme extérieur pour amorcer le soulèvement. Le plus naturel et le plus efficace est le soulèvement orographique, mais de nombreux mécanismes sont possibles (Banta, 1990).

Le relief a un effet important sur le déclenchement et le renforcement des précipitations. Les connaissances actuelles en climatologie permettent de dire que le renforcement de la pluie varie de 50 à 85% pour les reliefs peu marqués (collines de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres de hauteur) jusqu'à plus de 200% pour des reliefs marqués (au dessus de 1 à 2 km). Le relief agit en effet comme un catalyseur de la formation de la pluie. Il freine les masses d'air, canalise l'humidité, le vent et la chaleur en certaines zones et de ce fait déclenche ou renforce les mécanismes de convection, condensation et précipitations. D'après Miniscloux et al., (2002), le relief favorise également

la convection peu profonde en amenant les particules en instabilité conditionnelle à leur niveau de convection libre. Les précipitations qui sont alors engendrées (précipitations orographiques) ont un impact en hydrologie : même si les intensités pluvieuses sont faibles, les cumuls peuvent être importants du fait de la durée des événements. Une pluie de 4 mm/h pendant 10 heures donne un cumul de 40 mm.

#### **I.1.2.3.2. Effet de l'emplacement géographique**

Les variations des précipitations qui peuvent être observées dépendent de la localisation. Elles sont faibles en climat tempéré océanique ou en climat équatorial alors qu'elles sont très grandes dans tous les climats arides ou semi-arides.

Plus le site considéré se situe à une latitude élevée, plus l'effet sur les pluies est important (Oke, 1978 ; Choissnel, 1986).

En Algérie, les précipitations diminuent chaque fois que l'on s'éloigne de la méditerranée vers le sud. Les pluies et la latitude forment une relation proportionnelle, phénomène appelé effet de la continentalité.

L'effet de la longitude sur les précipitations varie plus par rapport à la variation saisonnière du climat donc son effet est lié à d'autres facteurs influents les précipitations (Barancourt, 1990).

#### **I.1.2.3.3. Effets du vent et du végétale**

L'influence du vent dans des environnements à variations spatiales est importante (effet de crête, effet de versant, effet de col etc.) (Choissnel, 1986). L'inhomogénéité du champ de vent a deux aspects de modification en fonction du couvert végétatif en montagne :

-là où la vitesse des vents est élevée et si de plus le sol ou la végétation est humide en surface, une part importante du rayonnement est utilisée pour l'évaporation et la pluviométrie en effet est importante. Ce raisonnement s'applique au cas d'un massif montagneux au printemps et au démarrage de la végétation ;

- le champ de vent influe à petite échelle la distribution au sol des précipitations particulièrement si elle se produit sous forme de neige : les précipitations ont tendance à se déposer dans les endroits abrités (sous le vent) là où la micro turbulence de l'air est minimale

#### **I.1.2.3.4. Effets de l'humidité de l'air et de la température**

La formation des systèmes nuageux est un phénomène lié aux mouvements verticaux de l'air et aux changements d'état de l'eau présente dans l'atmosphère. Au cours du soulèvement d'une particule d'air chaud et humide, les transformations subies par le mélange d'air et d'eau entraînent la saturation progressive de l'air et la condensation de la vapeur d'eau, celle-ci se traduisant par l'apparition des gouttelettes de nuage autour de microparticules hygroscopiques, les noyaux de condensation. Ce processus est à l'origine de la formation de

la plupart des nuages, au sein desquels des précipitations peuvent se déclencher (Triplet et

Roche, 1986 ; Rogers et Yau, 1989).

Pour qu'il y ait des précipitations au sol, le nuage doit être suffisamment alimenté en humidité par les basses couches pour permettre l'instabilité des gouttelettes et leur transformation en gouttes suffisamment grosses pour chuter.

#### I.1.2.4. Régimes des précipitations en régions méditerranéennes

Les pluies méditerranéennes sont irrégulières en ce terme de répartition spatiale, de fréquence et en quantité, certaines zones sont régulièrement arrosées que d'autres, pourtant voisines.

Selon Baldy (1993), en fonction des saisons, les pluies méditerranéennes se caractérisent par :

- **En hiver** : les pluies sont de type océaniques dues surtout à des perturbations d'Ouest de grandes dimensions spatiales ; elles sont généralement de faible intensité instantanée mais, de longues durées, on note une réduction des précipitations de hautes altitudes ; cependant , la pluviosité augmente aux altitudes moyennes, sur des massifs au vent. Dans les régions plus arides, leurs importances relatives décroît plus vite que la pluie totale ;
- **Au printemps et à l'automne** : parfois aussi en hiver en régions à climat aride, la plupart des pluies proviennent d'orages intéressant de faibles surfaces. L'intensité de la pluie est couramment supérieure à 60 mm/h. Ces pluies de courtes durées en général, sont liées aux déplacements des fronts. Certaines situations topo climatiques favorisent le développement fréquent d'orages de reliefs en fin de la journée, souvent accompagné de grêles.

#### I.1.2.5. Analyse de répartition temporelle des pluies dans la zone méditerranéenne

L'analyse fréquentielle des pluies dans la zone méditerranéenne ne rend pas compte du paramètre précipitation. Selon Baldy (1993), aucune corrélation n'a été mise en évidence entre les pluies d'automne et celle du printemps, par ailleurs, on observe une grande similitude entre les répartitions d'un mois (ou trimestre) donné, pour des stations situées dans une même zone climatique et altitude. Il est difficile de reconstituer des pluies unitaires en un lieu donné. Les précipitations automnales et printanières ont souvent une répartition bimodale mais elle varie beaucoup selon les années : un mois particulier pourra être sec ou pluvieux ; et la moyenne dans ce cas n'a aucun sens.

#### I.1.3 Notion de pluie utile

La notion de pluie utile découle directement de la notion d'intensité de pluie limite du ruissellement. C'est le total pluviométrique de l'averse lorsqu'on ne prend pas les intensités de pluie qui dépassent le seuil correspondant à la limite du ruissellement.

La formulation mathématique de la pluie utile est la suivante :

$$PU = \sum (IP_i \cdot dt_i) \text{ Pour } IP_i \geq IL$$

Où  $IP_i$  est l'intensité d'averse (n) durant un intervalle de temps  $dt_i$ ,

$i$  est un numéro d'ordre du pas de temps (dt) au cours de l'averse,

$IL$  est l'intensité de pluie limite du ruissellement au début de l'averse (n), elle est considérée comme une constante pendant toute l'averse.

Les différents types de précipitations ont des effets importants pour les sols et la végétation. En zones plus ou moins sèches, les premières pluies sont plus souvent orageuses. Elles tombent sur des sols dénudés par la phase de sécheresse d'un été chaud et sec, une faible pluie s'infiltré à leurs points de chute, la plus grande partie sera donc perdue là où est tombée et engendrera des écoulements superficiels très importants, celles-ci provoqueront de fortes érosions.

Pendant la période pluvieuse, la vitesse d'infiltration du sol dépend de sa structure, de sa teneur en matière organique, de sa granulométrie, de sa porosité (exprimée par sa densité apparente) et de sa profondeur. Selon des cas ces vitesses limites d'infiltration atteindront 5, 10, 15 mm/h, ou plus. Au delà, on aura un ruissellement, accompagné ou non d'érosion hydrique, selon la couverture du sol. Ces valeurs sont fortement modifiées par la présence ou l'absence de la végétation, et par le développement des parties aériennes et par la densité d'enracinement de celle-ci (Casenave et valentin, 1989).

#### **I.1.4. Spatialisation des précipitations**

La variation spatiale des données climatiques en particulier les précipitations ont un impact significatif sur le choix des zones agro climatiques ou aptitude culturale d'une région. En plus des stations du réseau qui ne permettent pas de couvrir l'ensemble des situations de surface, aussi devront nous utiliser des méthodes d'interpolations spatiales. Nous présenterons quelques approches développées pour estimer les précipitations que nous estimons parmi les paramètres climatiques qui varient le plus spatialement.

##### **I.1.4.1. Méthode Aurhely**

Cette méthode est développée par Bénichou et Le Breton en 1987, elle est utilisée pour cartographier la répartition de la pluie. Elle repose sur l'information liée aux reliefs, et elle se décompose en deux principales étapes :

- Une analyse en composantes principales effectuée à partir d'un MNT qui permet de définir les facteurs déterminant du relief pour la pluviométrie (zone concave, convexe, crête,...) ;
- L'estimation de la suite des pluies est faite par la régression linéaire suivant les premières composantes de l'ACP. Les résidus sont finalement krigés.

##### **I.1.4.2. Méthode de krigeage directe**

Le krigeage est un estimateur conçu comme une combinaison linéaire des données spatiales, sans biais, et optimal dans le sens où la variance de l'erreur d'estimation est minimisée. Les pondérateurs intervenants dans la combinaison linéaire sont acquis en résolvant le problème de minimisation dont les équations dépendent de la connaissance du variogramme théorique, et de la configuration géométrique des points de données pluviométriques. Le paramètre le plus sensible est la présence plus ou moins importante d'un effet de pépite. Celui-ci tend à ramener l'estimateur autour de la moyenne globale et à désatialiser l'interpolation. La valeur de la variance de krigeage est très sensible aux paramètres du modèle de variogramme, notamment de son comportement à l'origine (Allard et al, 2002).

#### **I.1.4.3. Approche par la télédétection**

Cette approche donne l'avantage de délivrer une résolution spatiale intéressante et des informations plus accessibles à l'aide de radars et à l'image thermique.

- **Les radars** permettent d'analyser la structure des événements pluvieux et d'estimer des quantités, mais la précision reste encore discutable et variable suivant les zones étudiées et de leur distance dans le périmètre vu par le radar et, des problèmes liés à la topographie ;
- **Les images thermiques** attribuées par les satellites météorologiques comme le satellite N.O.A.A. ou Météosat peuvent apporter potentiellement des informations sur la variabilité spatiale des pluies (Seguin et al, 1989).

#### **I.1.4.4. Méthode des polygones de Thiessen**

La méthode des polygones de Thiessen fait appel à la propriété géométrique pour déterminer la région d'influence et donc le poids de chaque station. Cette méthode qui permet entre autre de considérer l'influence de stations périphériques, est peu efficace lorsque la topographie est irrégulière puisque la définition de chaque zone ne tient pas compte de ce paramètre. La méthode convient notamment dans le cas où le réseau pluviométrique est hétérogène spatialement (pluviomètres répartis irrégulièrement). Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur enregistrée. Cette méthode est une méthode arithmétique dans laquelle, on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale, du pluviomètre correspondant que de tout autre pluviomètre. La méthode ne tient compte que de la distribution spatiale en plan des stations (Roche, 1963).

#### **I.1.4.5. Méthode des isohyètes**

La méthode des isohyètes (ligne reliant des points d'égale hauteur de précipitation recueillie pendant une période donnée) repose sur une interpolation de surface définie par les précipitations mesurées à chaque site.

Cette méthode requière une certaine habileté de la part de l'hydrogéologue qui trace les isohyètes. Elle permet également de tenir compte directement de la topographie en adaptant au bassin la position des isohyètes (Antil et al, 2005).

#### **I.1.5. Choix de méthode de spatialisation**

Selon Antil et *al.* (2005), le choix d'une méthode dépend de plusieurs considérations notamment ; 1) l'objectif poursuivi ; 2) la nature de la région étudiée ; et 3) le temps et les ressources disponibles. Si l'objectif est d'obtenir une estimation sommaire de la valeur moyenne ou encore, si les ressources sont limitées, une méthode directe ou par ajustement simple de la surface sera suffisante. Par contre, l'efficacité réelle de ces méthodes repose largement sur une densité adéquate de mesures ponctuelles de la précipitation.

A cet égard, une topographie régulière et plane exige moins d'informations qu'une région montagneuse. Dans ce dernier cas, on conseille le recours à des méthodes plus complexes d'ajustement de surface.

## I.2. Température de l'air

---

Douguedroit, (1986) définit la température d'un lieu par l'ensemble des deux sortes de températures dont la première est relative au topo climat correspondant au lieu, et la deuxième porte sur la température obtenue par l'effet du couvert. En revanche, la présence de ce dernier étendu et élevé cause une modification de la température de la couche limite de l'atmosphère par rapport à celle des topo climats (climat- forêt, climat- urbain).

Ainsi, même si la température semble plus homogène spatialement et temporellement que la pluie, il n'en demeure pas moins que sa variabilité spatiale peut être importante selon les régions et les types de surfaces rencontrées (Courault et Ruget, 2001).

### Mesures de la température

La mesure de la température de l'air est fortement influencée par l'environnement des sites météorologiques, en particulier par l'état hydrique des surfaces.

On en trouve des différents moyens appropriés dans ce but. Cependant, d'après Seguin (1986), la température peut être mesurée dans l'optique d'une application agro météorologique à l'aide de plusieurs approches à savoir : 1) Approche du réseau temporaire spécifique et 2) Approche de la télédétection.

## I.3. Humidité atmosphérique

---

D'après Estienne et Godard, (1970) pour bien comprendre l'humidité atmosphérique, nous sommes obligés de saisir ces trois notions qui la constituent :

### I.3.1. Evaporation

Dans la toute première couche de l'atmosphère au-dessus de la Terre "la troposphère" (environ 10 km), l'air n'est jamais pur et possède toujours une quantité plus ou moins importante d'eau gazeuse ou "vapeur d'eau". Cette dernière est fournie à la fois :

- - Par l'évaporation physique au-dessus des océans et des mers, voire sur des sols humides, des lacs et des cours d'eau;
- - et, par l'évapotranspiration physiologique du couvert végétal.

Parmi les facteurs composant l'évaporation, il faut retenir en premier lieu la température et la radiation solaire directe (sources de calories). En second lieu, intervient l'humidité atmosphérique, et par conséquent la vitesse du vent qui renouvelle l'air, remplace l'air humide par de l'air plus sec, plus capable de stocker de la vapeur d'eau.

### **I.3.2. Humidité absolue**

C'est la masse de vapeur d'eau contenue dans une unité de volume d'air. En climatologie, elle signifie la tension de vapeur d'eau exprimée souvent en grammes par m<sup>3</sup>. Théoriquement, elle ne peut pas dépasser une certaine valeur-plafond appelée tension maximale ou critique. A partir de cette valeur, l'eau revient à son état liquide. La vapeur d'eau se condense sous forme de fines gouttelettes, la valeur de l'humidité saturante est évidemment essentielle à connaître. Or elle n'est pas fixe et dépend de la température : faible pour de l'air froid, elle s'élève de plus en plus rapidement avec l'augmentation de la température.

### **I.3.3. Humidité relative**

L'humidité absolue, n'en est pas moins qu'une notion abstraite qui nous informe sur l'éloignement où se trouve l'air de son point de saturation (ou point de rosée). Or les impressions courantes d'humidité ou de sécheresses reposent avant tout sur le déficit de saturation, c'est-à-dire sur l'écart entre les deux humidités saturante et absolue.

Le rapport d'humidité absolue par l'humidité saturante met en évidence la notion très concrète d'humidité relative, qui est exprimée en pourcentage. Evidemment le point de rosée est atteint à 100%. Mais la condensation peut entraîner à son tour un réchauffement qui permet un éloignement du point de saturation et donc une augmentation de l'humidité.

### **I.3.4. Mesure de l'humidité de l'air**

L'humidité de l'air et la vitesse des vents sont peu mesurées par rapport aux principaux paramètres précédemment décrits (précipitation, température et l'évaporation). En revanche, les mesures du taux de l'humidité de l'air sont temporaires et faites pour des applications bien spécifiques comme le séchage de l'herbe (Seguin, 1986).

La mesure de l'humidité de l'air se fait grâce aux différents psychromètres. Tous les psychromètres se composent de deux thermomètres : l'un à bulbe nu, appelé thermomètre sec, l'autre dont le bulbe est entouré d'une mousse humide appelé thermomètre humide. Le premier donne la température sèche, le second renseigne sur la température humide (Roche, 1963).

## **I.4. Concept de l'évapotranspiration**

---

C'est un processus physico biologique qui se définit par la perte d'eau d'une culture sous forme de vapeur, par évaporation et transpiration, pendant un intervalle de temps considéré. Elle comprend l'évaporation de l'eau du sol, de la rosée, de l'eau de pluie interceptée par les surfaces, ainsi que la transpiration des plantes qui dépend de la régulation stomatique.

L'évapotranspiration comme l'évaporation consiste en un passage dans l'atmosphère de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse : c'est un phénomène consommateur d'énergie. Chaque gramme d'eau qui passe de l'état liquide à l'état de vapeur exige l'apport d'environ 600 calories (1 mm d'évaporation représente environ une absorption de 60 calories par centimètre carré).

Par opposition à la pluie, l'évapotranspiration est un phénomène continu dans le temps. Dans tous les calculs d'évapotranspiration, plusieurs facteurs météorologiques vont jouer un rôle. Certains entre eux pourront même devenir limitants, c'est-à-dire qu'ils ne permettront plus la réalisation de la fonction chlorophyllienne de la plante. Dans tous les cas, cet aspect

limitant sera due à une trop forte demande en eau du milieu ambiant par rapport à ce que peut fournir la plante (demande climatique trop élevée).

#### **I.4.1. Facteurs influant l'évapotranspiration**

Les facteurs conditionnant l'évapotranspiration sont nombreux et variés. Elle est influencée par des facteurs physiques, géographiques et physiologiques (Castany, 1963).

##### **I.4.1.1 Facteurs physiques**

Ces facteurs se répartissent en deux groupes : atmosphériques et hydrogéologiques.

Les facteurs atmosphériques déterminent le pouvoir évaporant de l'atmosphère, ce dernier conditionne à lui seul l'évapotranspiration. Il résulte de l'action du déficit hygrométrique, de la température, de la vitesse de la turbulence du vent et de la pression barométrique. Il convient d'ajouter à cette liste des facteurs atmosphériques l'influence indirecte des variations d'intensité de la lumière.

Les facteurs hydrogéologiques conditionnent l'état de la surface évaporante du sol. Cette surface intervient par ses caractères physiques comme la granulométrie, la porosité, sa nature lithologique, sa couverture végétale et sa richesse en eau.

##### **I.4.1.2. Facteurs physiologiques**

Le végétale conditionne la transpiration, et par conséquent il conditionne l'évapotranspiration par espèce végétale, âge, développement du feuillage et profondeur des racines.

##### **I.4.1.3. Facteurs géographiques**

Nous devons mentionner également l'influence des facteurs géographiques, altitude et zones climatiques en particulier, qui agissent surtout par l'intermédiaire des variations des facteurs météoriques : température, pression barométrique, ...etc.

#### **I.4.2. Evapotranspiration potentielle**

L'évapotranspiration potentielle est définie comme l'ensemble des pertes en eau d'une culture de référence couvrant le sol, ayant une hauteur uniforme de quelques centimètres, à son stade de développement végétatif maximal et dans des conditions optimales d'eau et de fertilisation

## **CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE QUELQUES ELEMENTS DE STATISTIQUES ET DE GÉOSTATISTIQUES**

### **Introduction**

---

Un ensemble de techniques et de procédés sont utilisés afin d'acquérir une information sur un objet à localisation bien définie sur terre, qui ont pour but final la réalisation d'une cartographie thématique.

A l'aide d'une gamme de moyens appartenant à différentes approches, le cartographe, dans le domaine de l'environnement en général (pédologie, climatologie, hydrologie,...etc.), a connu une aise dans la longue démarche menant à la sortie de la carte. Cette carte, peut être sujet de renseignements multiples : la distribution des pluies, la dégradation des sols, les catégories végétales,...etc.

La représentation des données spatiales obéit à des approches technologiques et statistiques. Dans l'approche technologique, une variété de procédés peut être effectuée à partir d'une information positionnée géographiquement. Grâce à de nombreux logiciels de cartographie, aujourd'hui le cartographe peut réaliser facilement différentes cartes thématiques dont il a besoin.

En ce qui concerne l'approche statistique, nous pouvons dire qu'elle a révélé un grand apport dans l'interprétation de la variabilité spatiale et dans l'interpolation des données en particulier les données climatiques.

Ce chapitre présentera les études statistiques et géostatistiques des variables spatiales et les différents outils de la représentation sur carte des paramètres spatiaux.

## **II.1 Approche statistique**

---

Partant de l'hypothèse que la plupart des relevés qui représentent les séries climatologiques temporelles ne fournissent que des informations souvent hétérogènes au cours d'un cycle. Il est difficile de juger de la qualité, l'exactitude et de la continuité des séries. Ces dernières rendent peu significatifs les calculs effectués.

Ainsi, les méthodes statistiques et techniques établies qui permettent de vérifier, homogénéiser les observations sont nombreuses, et parmi les éléments statistiques les plus utilisés nous citons les statistiques élémentaires (Dagnelie, 1973)

### **II.1.1. Statistiques élémentaires descriptives**

L'étude d'une série (numérique, temporelle...) présuppose une analyse descriptive détaillée afin de mettre en évidence les faits stylisés. On cherche en fait à décrire un échantillon en mettant en relief les principales caractéristiques et propriétés de ce dernier. Il est fondamental de représenter les données dont nous disposons de façon à pouvoir analyser les trajectoires du processus sous-jacent.

Ceci nous donne une première indication des distributions statistiques univariées et des statistiques de base caractérisant la série. Ensuite, il est utile de connaître la forme des distributions (Mouchiroud, 2002).

#### **II.1.1.1. Les valeurs moyennes**

Face à une distribution statistique, la première observation naturelle passe par la simplification de cette dernière : on tente de remplacer la complexité et la multiplicité des données par une caractéristique unique et centrale. Cependant, le remplacement d'un certain nombre de données par une seule notation implique la perte d'une certaine quantité d'information dans la connaissance de la série statistique. Dans notre cas, nous nous

intéresserons principalement à une moyenne simple élémentaire (moyenne arithmétique), une moyenne de position (la médiane) et le mode.

#### II.1.1.1.1. La moyenne arithmétique

Elle est de loin la plus utilisée, et la plus connue.

Soit un ensemble numérique  $X$ , à  $n$  éléments :  $X = \{ X_1, X_2, X_3, \dots, X_n \}$ .

Par définition, pour une série numérique, la moyenne arithmétique se définit comme

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

#### II.1.1.1.2. La médiane

La médiane est une caractéristique de position. Elle donne lieu à des rangements et à des mises en ordre sur la série statistique.

Par définition, la médiane est le nombre occupant le milieu de la distribution statistique. Elle est souvent utilisée en présence de valeurs extrêmes (aberrantes).

Pour obtenir une médiane, il faut ranger en ordre croissant ou décroissant les nombres de la suite, et examiner la parité de la suite :

- si la suite possède un nombre impair d'éléments, soit  $(2n+1)$ , la médiane est constituée par le  $(n+1)$ -ième élément,
- si la suite possède un nombre pair de terme, soit  $(2n)$ , la médiane est constituée par la moyenne arithmétique du  $(n)$ -ième élément et du  $(n+1)$ -ième élément.

#### II.1.1.1.3. Le mode

Le mode, *Mo* d'une série statistique est la valeur du caractère la plus fréquente ou dominante dans l'échantillon. Le mode correspond à la classe de fréquence maximale dans la distribution des fréquences.

On peut identifier le mode comme la valeur médiane de la classe de fréquence maximale ou bien effectuer une interpolation linéaire pour obtenir la valeur exacte du mode comme suit :

$$M_o = X_m \frac{i \Delta i}{\Delta i + \Delta s}$$

Avec :

$X_m$  : limite inférieure de la classe d'effectif maximal ;

$i$  : intervalle de classe ( $X_{m+1} - X_m$ ) ;

$\Delta i$  : Ecart d'effectif entre la classe modale et la classe inférieure la plus proche ;

$\Delta s$  : Ecart d'effectif entre la classe modale et la classe supérieure la plus proche.

### II.1.1.2. Indicateurs de dispersion

Les indicateurs de dispersion ont pour objectif dans le cas d'un caractère quantitatif de caractériser la variabilité des données dans l'échantillon, et les plus fondamentaux entres ces indicateurs sont la variance observée, l'écart-type observé et le coefficient de variation.

#### II.1.1.2.1 La variance

Soit un échantillon de  $n$  valeurs observées  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$  d'un caractère quantitatif  $X$  et, soit  $\bar{X}$  sa moyenne observée. On définit la variance observée notée  $V$  comme la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne.

$$V^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

#### II. 1.1.2.2. L'écart type

L'écart type correspond à la racine carrée de la variance

$$V = \sqrt{S^2}$$

#### II. 1.1.2.3. Le coefficient de variation

La variance et l'écart-type observée sont des paramètres de dispersion absolue qui mesurent la variation absolue des données indépendamment de l'ordre de grandeur des données.

Le coefficient de variation noté  $CV$  est un indice de dispersion égal à :

$$CV = \frac{100 S}{\bar{X}}$$

### II.1.2. La fonction de corrélation

Il est préférable d'adopter une vision plus globale, en utilisant la notion de fonction de corrélation sous certaines hypothèses de stationnarité du champ, on peut considérer que le coefficient de corrélation entre points ne dépend que de vecteur les joignant, et non de leurs emplacements. Selon Delhomme, (1976) l'interprétation climatologique des résultats s'appuie sur le fait que, plus la décroissance de la fonction de corrélation est rapide, plus la variabilité spatiale de pluviométrie est importante.

#### II.1.2.1. La régression linéaire

D'après Dagnelie, (1973), il considère le cas où une variable  $Y$  est à prédire à partir d'une variable  $X$  ; ou plusieurs variables  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

Les différents coefficients seront déterminés par ajustement aux moindres carrés de ces relations, les  $E_i$  représentent les erreurs du modèle de régression.

Si les erreurs  $E_i$  suivent une loi normale et de la variance  $V^2$ , il est alors possible de quantifier la qualité de la régression par le coefficient de détermination suivant :

$$r^2 = 1 - \left( \frac{E_i^2}{V^2 y} \right)$$

Avec  $(y)$  la variable aléatoire prédite par la régression.

$(r^2)$  mesure la proportion de variance expliquée par la régression ; c'est la fluctuation expliquée a la fluctuation totale autour de la moyenne générale.

La recherche la plus simple et la plus directe de corrélation n'est pas cependant obligatoirement la plus efficace car de nombreuses liaisons entre paramètres sont généralement non linéaires.

#### II.1.2.2. La régression multiple

Il arrive souvent qu'on veuille expliquer la variation d'une variable dépendante par l'action de plusieurs variables explicatives, Lorsqu'on a des raisons de penser que la relation entre ces variables est linéaire, on peut étendre la méthode de régression linéaire simple à plusieurs variables explicatives; s'il y a deux variables explicatives, le résultat peut être

visualisé sous la forme d'un plan de régression dont l'équation est :

$$Y_i = b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + b_0$$

Le plan est ajusté selon le principe des moindres carrés où les sommes des carrés des erreurs d'estimation de la variable dépendante sont minimisées.

S'il y a plus que deux variables explicatives, on peut étendre la méthode en ajoutant les variables et leurs paramètres :

$$Y_i = b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_m X_{im} + b_0$$

Cette équation est celle d'un hyperplan à  $m$  dimensions (qu'on ne peut pas se représenter concrètement). Les paramètres  $b_1$ ,  $b_2$  et  $b_m$  sont les "pentes" de l'hyperplan dans les dimensions considérées, et sont appelés "coefficients de régression".

La régression multiple peut être utilisée à plusieurs objectifs :

- Trouver la meilleure équation linéaire de prévision (modèle) et en évaluer la précision et la signification ;
- Estimer la contribution relative de deux ou plusieurs variables explicatives sur la variation d'une variable à expliquer; déceler l'effet complémentaire ou, au contraire, antagoniste entre diverses variables explicatives ;
- Juger de l'importance relative de plusieurs variables explicatives sur une variable dépendante en lien avec une théorie causale sous-jacente à la recherche.

## II.2. Bases conceptuelles de la géostatistique

---

La géostatistique est utilisée pour l'étude des phénomènes naturels qui se déploient dans l'espace, appelés phénomènes régionalisés. Une variable régionalisée est donc une grandeur définie sur un domaine de l'espace. Il peut s'agir d'espace à 1, 2 ou 3 dimensions ou du temps.

### II.2.1. La géostatistique

La géostatistique, estimation des valeurs en des points précis de l'espace, fournit un ensemble de méthodes statistiques qui décrivent l'auto corrélation spatiale des données de l'échantillon. Elle étudie le problème posé par les variables régionalisées (variable ayant un caractère aléatoire régionalisé).

L'analyse de la dépendance spatio-temporelle des observations par la géostatistique permet l'extension des techniques développées typiquement dans le seul contexte spatial (ou temporel) et d'inclure le temps (ou l'espace) comme une dimension additionnelle (Kyriakidis et Journel, 1999).

De manière générale, la géostatistique s'intéresse principalement aux problèmes :

- d'estimation de la valeur de la variable d'intérêt en des points dépourvus de mesure ;
- d'évaluation de la valeur moyenne sur une surface du domaine d'étude à partir de mesures ponctuelles disponibles et de la connaissance de la structure spatiale du phénomène.

La possibilité d'accéder à l'incertitude associée aux valeurs estimées rend les méthodes issues de la géostatistique utiles au moment de la conception d'un réseau de mesures ou, dans le but de son optimisation, pour évaluer l'apport d'un nouveau point de mesure à un réseau déjà en fonctionnement.

### II.2.2. La fonction aléatoire

D'aprèsBoulanger, (1990) une fonction aléatoire  $Z(x)$  est un ensemble de variables aléatoires distribuées dans l'espace et dont la valeur est une fonction de la position  $x$  dans un domaine  $D$ . La variable  $Z(X)$  est considérée comme une réalisation d'une fonction aléatoire  $Z(X,Y)$ , définie à la fois dans l'espace géographique et dans l'espace probabiliste :

$$Z(x) = Z(x, W_{\omega})$$

Il s'agira d'obtenir un modèle probabiliste à partir d'une réalisation unique de la fonction aléatoire, c'est-à-dire à partir de la variable régionalisée.

Deux hypothèses fortes sont faites :

- Selon l'hypothèse d'ergodicité, une unique réalisation suffit pour analyser l'ensemble des réalisations possibles du phénomène aléatoire considéré. En quelque sorte, lorsqu'elles sont réalisées sur des domaines de plus en plus grands, les moyennes de la variable régionalisée tendent vers l'espérance mathématique de la fonction aléatoire. On peut considérer que l'on approche la loi de la probabilité de la fonction aléatoire sous réserve que l'information soit suffisamment abondante (échantillonnage suffisant);
- L'hypothèse destationnaritésuppose que cette loi est la même en tout point, c'est-à-dire invariante par translation. Dans la pratique, on se contente de la stationnarité des moments d'ordre 1 et 2 (espérance et variance). Mais en général, en géostatistique on se place dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque encore moins contraignante ; dans ce cas, seuls les moments d'ordre 1 et 2 des écarts de  $Z$  entre 2 points sont considérés indépendants de  $X$ . Cette hypothèse permet de définir le variogramme comme outil d'analyse de structure spatiale et de résoudre les problèmes d'estimation par krigeage ordinaire.

### II.2.3. La fonction variogramme

Le variogramme est une fonction de structure utilisée pour modéliser la variabilité d'un phénomène. Il mesure la variabilité des écarts entre couples de variables d'une fonction aléatoire et s'exprime en fonction du vecteur de distance entre les points. Dans le cas d'un phénomène isotrope, la fonction de structure dépendra seulement du module de cette interdistance. Soit le cas le plus simple : à deux points de coordonnées géographiques  $X_i$  et  $X_j$  sont associées deux valeurs  $Z(X_i)$  et  $Z(X_j)$ , observation ou mesure d'une grandeur donnée. Pour comparer ces deux valeurs, on préfère, à l'utilisation de mesures comme la différence algébrique ou sa valeur absolue, la mesure statistique de la variance  $S^2$  entre les deux valeurs, dont la moyenne est notée  $Z_m$  :

$$S^2 = \{Z(X_i) - Z_m\}^2 - \{Z(X_j) - Z_m\}^2 = \frac{1}{2} \{Z(X_i) - Z(X_j)\}^2$$

Exprimé également par :

$$S^2(h) = \frac{1}{2m} \sum_i^m \{Z(X_i) - Z(X_i + h)\}^2 \text{ avec } h = \text{distance séparant } X_i \text{ et } X_j$$

### **II.2.3.1. Caractérisation d'un variogramme**

Un variogramme se caractérise par :

#### **II.2.3.1.1. L'effet de pépité (Nugget Effect)**

C'est le comportement à l'origine du variogramme ou le comportement aux très courtes distances, qui a une relation directe avec le caractère plus ou moins lisse de la variable.

Il reflète les erreurs de localisation, d'analyse, ou bien encore de précision pouvant fausser nos calculs.

#### **II.2.3.1.2. La portée (Range)**

C'est la distance où deux observations n'ont aucune ressemblance en moyenne, cela veut dire qu'elles ne sont plus liées linéairement. Autrement dit, elle est la distance à laquelle le variogramme atteint un plateau.

#### **II.2.3.1.3. Le palier (Sill)**

Le palier, renseigne sur les plus grands écarts en moyenne qui se présentent entre deux variables aléatoires. Au delà de cette limite, le variogramme se stabilise.

Afin de rendre possible l'étude d'une telle fonction aléatoire et l'estimation de ses paramètres, des hypothèses de stationnarité doivent être faites, permettant de remplacer l'absence de répétition par une abondance spatiale des données (Allard et al, 2002).

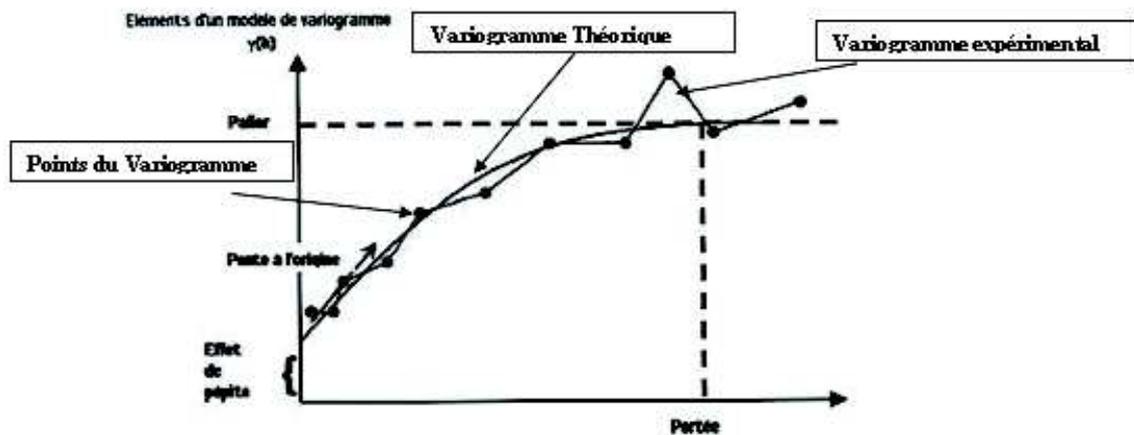


Figure II.1 : Variogramme expérimental et variogramme ajusté

### II.2.3.2. Ajustement variographique

Selon Arnaud, et Emery, (2000), l'étape d'ajustement est l'étape la plus délicate de l'interpolation spatiale. En effet, le choix d'une fonction servant de modèle est des plus important, du fait que les résultats de cette modélisation sont utilisés par le krigeage. Un modèle non approprié implique une mauvaise interpolation. On ajuste donc un modèle théorique au variogramme expérimental, celui-ci étant une expression analytique que nous tenterons d'ajuster le mieux possible aux points du variogramme expérimental. Ayant le choix entre différents modèles, la sélection de l'un d'entre eux répondant le mieux au problème étudié s'impose donc. Pour ce faire, une validation croisée devra être appliquée sur les paramètres du variogramme.

Le principe est d'éliminer à tour de rôle chaque observation et de l'estimer grâce à ses points voisins. En chaque point on obtiendra une valeur estimée (résultat de la validation croisée) et une valeur vraie. On comparera donc ces deux valeurs (différence entre valeur estimée et valeur exacte) et retiendrons le modèle pour lequel :

- - La somme de ces erreurs est proche de 0 ;
- - La somme des erreurs normalisées est proche de 0 ;
- - La variance des erreurs normalisées est égale à 1.

#### **Remarque importante :**

Le calcul du variogramme et l'ajustement de modèles sollicitent une étude au préalable des distances. En effet :

- - Il faut que le nombre de paires de données intervenant dans le calcul des points du variogramme expérimental soit élevé ;
- - Nous devons accorder plus de poids aux premiers points du variogramme expérimental, étant entendu que ces valeurs sont déterminées pour des petites distances ;
- - Pour une valeur trop importante de la distance  $h$ , les points du variogramme ne seront pas utilisés lors de la modélisation.
- Après avoir modélisé le variogramme, le modèle ajusté peut être utilisé dans une procédure de krigeage afin d'estimer ces valeurs en des points non mesurés.

### II.2.3.3. Notion de dérive

Dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque nous avons supposé que :

$$E \{ Z (X + h) - Z (X) \} = 0$$

Nous retrouvons là une formulation commune à celle servant de fondements aux méthodes d'interpolation par ajustement d'une fonction aux moindres carrés. Mais dans ce cas-ci  $E(X)$  est supposé être une fonction aléatoire. Vérifiant l'hypothèse intrinsèque  $M(X)$  représente la dérive déterministe, définie telle que :  $E (Z(X)) = M(X)$ .

L'existence d'une dérive implique que l'estimation du variogramme par l'équation est biaisée :

$$\begin{aligned} 2 \gamma(h) &= E \{ Z (X + h) - Z (X) \}^2 \\ &= E \{ Z (X + h) - Z (X) \}^2 - E \{ Z (X + h) - Z (X) \}^2 \end{aligned}$$

$$2 \gamma(h) = 2 \gamma_{\dots}(h) - (M(X+h) - M(X))^2$$

$$D'où \gamma_{\dots}(h) = \gamma_{\dots}(h) - \frac{1}{2} (M(X+h) - M(X))^2$$

### II.3. krigeage

---

Dans sa conception la plus générale, le krigeage est un estimateur défini comme étant une combinaison linéaire de données sans biais, et optimal dans le sens où la variance de l'erreur d'estimation est minimisée.

Selon Arnaud et Emery, (2000) les pondérations intervenant dans la combinaison linéaire sont obtenues en résolvant le problème de minimisation dont les équations dépendent de la connaissance du variogramme théorique et de la configuration géométrique des points de données. Appliqué à l'estimation de  $Z(X)$  en un point non échantillonné, le krigeage est un interpolateur qui a pour avantage de fournir une variance d'erreur en plus de la valeur interpolée. Cette variation ne dépend pas explicitement des valeurs servant à l'interpolation, mais du modèle de variogramme, de la position du point interpolé et de la géométrie de l'échantillonnage. Ainsi l'observation des cartes de variance permet de définir les lieux de l'espace où l'échantillonnage pourrait être renforcé. Les estimateurs de krigeage sont assez robustes pour des écarts de modèle de variogramme. Le paramètre le plus sensible est la présence plus ou moins importante d'un effet de pépite (discontinuité à l'origine du variogramme théorique). Celui-ci tend à ramener l'estimateur autour de la moyenne globale et à « dé-spatialiser » l'interpolation.

La continuité de la carte interpolée est directement liée au comportement à l'origine du variogramme. En revanche, la valeur de la variance de krigeage est très sensible aux paramètres du modèle de variogramme, notamment de son comportement à l'origine.

D'après Baillargeon, (2005) les pondérations intervenant dans la combinaison linéaire sont obtenues en résolvant le problème de minimisation :

$$Z(\mathcal{B}) = \sum_{i=1}^K \lambda_i \times Z(\mathcal{X}_i)$$

Il doit être :

Sans biais  $E\{Z(\mathcal{B}) - Z(\mathcal{B})\} = 0$  (1)

Et optimal  $V\{Z(\mathcal{B}) - Z(\mathcal{B})\} = 0$  minimum (2)

Avec  $\hat{Z}(\mathcal{B})$  l'estimateur de la moyenne de Z sur B

$Z(\mathcal{X}_i)$  : la valeur connue de Z en un point  $\mathcal{X}_i$

K : le nombre de points expérimentaux utilisés pour l'estimation

$\lambda_i$  : les coefficients de pondération

Un tel estimateur est dit *biais* (best linear unbiased estimator)

Les conditions (1) et (2) peuvent être exprimées sous certaines hypothèses.

$$E\{Z(\mathcal{X} + h) - Z(\mathcal{X})\} = 0 \quad (3)$$

$$E\{V\{Z(\mathcal{X} + h) - Z(\mathcal{X})\}\} = 2\gamma(h) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^K \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^K \lambda_i \gamma(\mathcal{X}_i - \bar{\mathcal{X}}) + \mu = \gamma(\bar{\mathcal{X}}, \mathcal{B}) \quad (6)$$

Avec  $\mu$  multiplicateur lagrangien qui sert à minimiser (4).  $\lambda_i$  et  $\mu$  sont calculés par résolution matricielle du système de krigeage (5) et (6).

La variance d'estimation vaut alors :

$$\sigma_{\hat{Z}}^2 = \sum_{i=1}^K \lambda_i \gamma(\mathcal{X}_i, \mathcal{B}) + \mu - \gamma(\mathcal{B}, \mathcal{B}) \quad (7)$$

Avec  $\bar{\gamma}(\mathcal{X}_i, \mathcal{B})$  est la valeur moyenne du variogramme entre le point  $\mathcal{X}_i$  et un point décrivant B ;

$\bar{\gamma}(\mathcal{B}, \mathcal{B})$  est la valeur moyenne entre deux points décrivant le domaine B.

L'estimation de valeurs ponctuelles peut être considérée comme un cas particulier de l'estimation de valeurs moyennes.

Soit  $\mathcal{X}_0$  le point où l'on désire estimer la valeur de Z, la variance d'estimation devient :

$$\sigma_{\hat{Z}}^2 = \sum_{i=1}^K \lambda_i \gamma(\mathcal{X}_i - \mathcal{X}_0) + \mu \quad (8)$$

Car  $\gamma(\mathcal{X}_0, \mathcal{X}_0)$  est supposé égal à 0.

Cette dernière hypothèse n'est cependant validée que dans la mesure où le variogramme ne montre aucun effet de pépite, ou si ce dernier n'est pas imputable aux erreurs de mesures, dans le cas contraire  $\gamma(\mathcal{X}_0, \mathcal{X}_0)$  est soustrait au membre de droite de

Cette dernière hypothèse n'est cependant validée que dans la mesure où le variogramme ne montre aucun effet de pépite, ou si ce dernier n'est pas imputable aux erreurs de mesures, dans le cas contraire  $\gamma(\mathcal{X}_0, \mathcal{X}_0)$  est soustrait au membre de droite de l'expression ci-dessus ; cela revient à filtrer l'erreur de mesures (Vargas-Cuzman et al., 2003).

# CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE et SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (S.I.G.)

## Introduction

Basées sur des méthodes statistiques, des méthodes analytiques et descriptives permettent de matérialiser sous formes différentes la régionalisation agro climatique. Ces méthodes traitent des études placées dans le cadre régional ou local, qui comporterait la prise en considération de l'interaction de facteurs du milieu selon une échelle choisie.

### III.1. La cartographie

Grâce à cet outil, on peut désormais représenter différents paramètres dans l'espace, que ce soit des paramètres physiques ou naturels (Beguin et Pumain, 2003).

Deux formes sont existantes :

- La cartographie classique dont nous citons les travaux climatiques et bioclimatiques de Seltzer (1949), Chaumont et Paquin (1971);
- La cartographie numérique dont l'introduction a l'avantage de permettre de stocker sous forme de fichiers numérisés des informations pour pouvoir ensuite, les traiter et les reproduire automatiquement sous forme de documents cartographiques.

### **III.1.1. Le système de digitalisation cartographique**

C'est l'élément le plus essentiel, après avoir visualisé la carte. A l'aide du système de digitalisation cartographique, la conversion des éléments existants sous forme digitale est réalisable, en outre, on développe la base de données. La méthode de digitalisation la plus commune est celle de fixer la carte sur une table à digitaliser et à tracer les objets à cartographier grâce à un curseur ou à un stylet. Il est également possible d'utiliser les scanners pour digitaliser les données (photographies aériennes). Le résultat du scanner est une image graphique à la place de la délimitation des objets, comme le fait la table de digitalisation. Les logiciels du scanner produisent des fichiers graphiques de formats standards pour que l'utilisateur puisse les exploiter. Ces fichiers sont par la suite importés dans les S.I.G

## **III.2. Systèmes d'information géographique (S.I.G)**

---

Le SIG est un support technique permettant une bonne visualisation des données spatiales et de ce fait il présente une bonne perception de l'évolution du milieu. Il permet également aux gestionnaires d'avoir une approche globale et synthétique des problèmes.

Parmi les définitions existantes, nous rappelons les plus appropriées à nos objectifs.

### **III.2.1 Définitions**

Un Système d'Information Géographique est un ensemble de données numériques, localisées géographiquement et structurées à l'intérieur d'un système de traitement informatique comprenant des modules fonctionnels permettant de construire, de modifier, d'interroger, de représenter la cartographie, la base de données, selon des critères sémantiques et spatiaux (Gilliot 2000).

Un Système d'Information Géographique est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser tous les éléments référencés géographiquement sur la surface terrestre (postes météorologiques, les hauteurs terrestres, les terres agricoles, etc.), ainsi que tous les événements difficilement contrôlables qui s'y produisent (répartition des paramètres climatiques, déficit hydrique, effet du climat sur le sol, etc.) Beguin et Pumain, (2003).

Les S.I.G. offrent toutes les possibilités des bases de données (telles que les requêtes et les analyses statistiques), et aussi ils donnent une visualisation unique et une analyse géographique propre aux cartes. Ces capacités spécifiques font du S.I.G. un outil rare et unique, accessible aux cartographes de l'information climatique et s'adressant à une très grande variété d'applications. Les enjeux majeurs auxquels nous avons à faire face

aujourd'hui (ressources naturelles : les eaux et les sols, territoire, forêts, etc.) ont tous un lien étroit avec la géographie (Denegre et Salge, 2004).

Il existe d'autres définitions du système d'information géographique :

Selon Didier (1992) un système d'information géographique est un ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Selon Minvielle et Souiah, (2003) les S.I.G. sont des systèmes de traitement d'informations localisées dont les principales fonctions permettent de : saisir, stocker, mettre à jour, analyser, et de restituer des informations géographiques (spatiales) et les données descriptives qui leur sont associées. Ces données descriptives ou sémantiques peuvent être textuelles ou ponctuelles, le système d'information géographique permet entre autre de :

- rassembler, stocker et mettre à jour une information référencée à une localisation spatiale ;
- explorer les relations entre les données de cet espace ;
- analyser spatialement ces données dans une perspective d'aide à la décision concernant cet espace ;
- restituer l'espace graphiquement et numériquement.

### **III.2.2. Les systèmes d'analyse géographique**

Les systèmes d'analyse géographique sont des systèmes ayant les capacités de faire des interrogations traditionnelles sur les bases de données, pour inclure les aptitudes à analyser les données en se basant sur leurs localisations.

La requête traditionnelle de la base de données est valable, si l'on a à faire aux attributs du même objet. Mais quand les objets sont différents, la requête n'est pas valable. En effet on a besoin d'un système qui a la capacité de faire la comparaison entre les différents objets par leurs occurrences géographiques communes (Denegre et Salge, 2004).

#### **III.2.2.1. Base et banque de données spatiales et descriptives**

La base de données est l'élément central du système. Elle est une collection de cartes et d'informations associées sous forme digitale. Depuis que la base de données concerne les objets d'une zone, on peut la combiner à deux éléments. Une base de données spatiale faisant la description de la géographie (allure, position et l'emplacement) des objets de la zone et, une base de données décrivant les caractéristiques de ces objets ou leurs qualités. A titre d'exemple, nous pouvons avoir une caractéristique de l'objet défini au niveau de la base de données spatiales, alors que, pour ses qualités (sa superficie, son exploitation, etc.) sont trouvées dans la base de données descriptive.

Selon De Blomac et *al*, (1994) la base de données est l'acquisition de l'information sous forme de cartes existantes, la récupération de données numériques existantes, la collecte de données sur terrain. Elle représente la phase la plus laborieuse d'un SIG, et l'ensemble des données est souvent associé sous forme digitale. Dans certains systèmes, les bases de données spatiales et descriptives sont liées, aboutissent à la sortie d'une seule entité, et en d'autres systèmes, elles n'ont pas de relation entre elles.

La banque de données peut comprendre les informations géographiques (détails topographique, parcelles) mais aussi, et surtout des informations alphanumériques (statistiques,...) sans que les unes et les autres soient nécessairement reliées. Une banque

de données est donc constituée d'une base de données et des outils (logiciels) permettant son exploitation (Pornon, 1992)

### **III.2.2.2. Le système de gestion de la base de données**

Ce système est défini traditionnellement comme étant, un type de logiciel qui est utilisé pour la saisie, la gestion et l'analyse des données numériques. Ainsi, il peut être utilisé pour ces mêmes tâches dans les S.I.G. Cependant, nous devons reconnaître que les données spatiales sont parmi les éléments de la base de données à manipuler. A l'aide du système de gestion de la base de données, la saisie des données descriptives peut être effectuée. Ces données descriptives consistent dans les tabulaires et les résultats statistiques. Aussi ce système de gestion permet à l'utilisateur d'extraire des données spatialisées et les résumés statistiques pour en faire un rapport. Le système de gestion de la base de données permet la réalisation d'une très importante tâche. Cette dernière est l'analyse des données descriptives des objets spatiaux (De Blomac et al, 1994).

Les logiciels qui possèdent les capacités de visualisation cartographiques, de digitalisation et d'interrogation de la base de données sont souvent désignés par les systèmes de cartographie automatique (Automated Mapping) et gestion des équipements (Facilities Management).

### **III.2.2.3. Représentation de l'information sur S.I.G**

Selon Denegre et Salge, (2004) il existe différents modes de représentation de l'information géographique dans un S.I.G. dont les deux principaux sont :

#### **III. 2. 2.3.1. Le mode "Vecteur"**

Les limites des objets spatiaux sont décrites à travers leurs constituants élémentaires ou sous forme d'entité habituelle : les points, les arcs, les lignes ou les polygones, ces objets ainsi représentés sont identifiables. Chaque objet spatial porte un reconnaissant permettant de le relier à une table attributaire.

#### **III.2.2.3.2. Le mode "Raster"**

L'information initiale est désagrégée en une grille régulière, représentée en lignes et en colonnes. Chaque maille de cette grille a sa propre couleur signifiante. Ainsi, la juxtaposition des points reconstitue l'apparence visuelle du plan. C'est donc une image, une photographie ou un plan représenté par une grille de cellules picturales élémentaires appelées communément « pixels ».

##### **Le pixel**

Les données digitales sont codées par des pixels, ces derniers sont des matrices bidimensionnelles seulement possédants un nombre qui montre l'intensité de la radiation électromagnétique réfléchie dans une bande donnée.

### **III.2.3. Le système d'aide à la prise de décision**

Les techniques d'aide à la prise de décision (conseils) sont les fonctions les plus importantes de l'outil S.I.G., mais les programmes prévus pour cette sorte d'opération sont rares dans la plupart des systèmes. Cependant certains logiciels ont des modules variés développés spécialement pour le processus d'aide à la prise de décision pour l'affectation des ressources. Ces fonctions incorporent l'estimation des erreurs et des incertitudes,

l'évaluation cartographique multicritères et l'évaluation cartographique multi objets (Didier, 1992).

### III.2.4. Avantages des S.I.G

D'après Gilliot, (2000), dans le domaine de la cartographie automatique, les systèmes d'informations géographiques sont menés à faire plusieurs fonctionnalités informatiques, grâce à ses logiciels professionnels. Néanmoins, l'accès à cette technique est limité par de nombreux facteurs.

Les principaux avantages des S.I.G sont :

- Un Système d'Information Géographique permet d'exploiter toutes les informations qui disposent d'une position spatiale. Mais à la différence d'une carte conventionnelle en papier, un S.I.G nous permet de ressortir sous forme de couches arrangées toutes les informations dont on a besoin et d'exclure celles qui nous sont inutiles ;
- le S.I.G possède les aptitudes d'intégrer, visualiser, gérer, analyser, résoudre et présenter les informations d'une façon tout a fait illustrative.
- Les S.I.G permettent d'estimer des impacts visuels du futur ouvrage sur le paysage pour une mise en oeuvre optimale d'améliorer l'organisation par une plus grande fédération;
- c'est à partir de données d'origines diverses, traitants différents thèmes qu'il sera possible grâce à un S.I.G de produire une information nouvelle et pertinente apportant une nouvelle clairvoyance sur le sujet traité;
- établir des cartes rapides car ces dernières issues du S.I.G sont réalisées en fonction d'une localisation choisie, d'une échelle définie tout en faisant apparaître les informations souhaitées. Cependant, l'information contenue dans le S.I.G. est continue sur l'ensemble du territoire et totalement indépendante des problèmes d'échelle;
- La mise en oeuvre de certains phénomènes, à savoir : la comparaison à différentes époques et la simulation d'hypothèses sont quelques importants avantages des cartes produites par un S.I.G.;
- L'information géographique numérique est facile à partager et à exploiter. Elle devient une information essentielle dans de nombreuses organisations qui l'utilisent comme cadre référence utilisable par tous;
- les S.I.G. sont parmi les moyens (matériels et organisationnels) performants permettant de diriger d'une manière efficace les données spatiales fiables, afin d'aménager les ressources réparties spatialement ;
- les S.I.G. sont des outils pour l'aménagement de l'espace rural en général, et pour la planification et la classification des terres en particulier;
- les S.I.G possèdent une propriété fondamentale de gérer une variété de bases de données spatiales (exemple : la pluviométrie, la température et les propriétés du sol) ;
- le S.I.G. est entre autre utilisé en tant qu'outil automatique dans de nombreuses tâches, telles que la présentation d'études sur le terrain, la résolution de problèmes territoriaux et tous les sujets concernant l'intégration dans un site.

Enfin, des bénéfices obtenus en ayant préféré un S.I.G. à des outils traditionnels restent bien souvent difficile à évaluer, d'autant que le S.I.G. offre des fonctions nouvelles, absence des outils manuels.

### III. 2.5. Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.)

Un Modèle Numérique de Terrain est un fichier numérique présentant de manière régulière les altitudes d'une zone géographique. C'est un ensemble de données constitué d'un maillage de points, régulier ou non, qui génère une information altimétrique géo référenciée. Il peut être confectionné par des méthodes topographiques, photogrammétriques ou par corrélation d'images (Deleuze, 2005).

Un M.N.T. est une représentation numérique des altitudes d'une surface. Il correspond à une grille régulière de points, localisés par leurs coordonnées géographiques (longitude et latitude), dont les altitudes ont été interpolées au départ par rapport à des points de référence liés aux courbes de niveaux et aux points de cotés. Le support de ce modèle peut être une représentation raster (division régulière de l'espace par des mailles carrées généralement) ou vectoriel (ensemble de points de mesure).

En cartographie, les altitudes sont habituellement représentées par des courbes de niveaux (isolignes) et des points cotés. Selon la dimension de la zone couverte, la plupart des modèles numériques utilisent un maillage régulier carré pour les petites zones ou, un maillage carré pour les grandes zones, dont les cotés sont des méridiens et des parallèles. En fonction du type de maillage, la représentation informatique du M.N.T. varie. Dans le cas de maillages rectangulaires, on peut utiliser des tableaux, mais dans les autres cas, les [structures de données](#) sont plus complexes.

## **CHAPITRE IV : ZONAGE AGROPEDOCLIMATIQUE ET INCIDENCE DES PARAMETRES CLIMATIQUES SUR LA CULTURE DU BLÉ DUR**

### **Introduction**

---

Le climat est considéré parmi les facteurs physiques les plus importants qui conditionnent l'évolution biogéographique, agro climatique et physiologique des cultures, notamment les blés. Dans ce contexte, afin de mettre en évidence en rapports blé climat à l'échelle régionale en zone de production céréalière notamment les zones semi-arides caractérisées par des conditions climatiques variables, il est important d'étudier le climat de manière statistique en considérant celui-ci comme étant un facteur géographique doté de caractéristiques définies et uniformes (Koteswaram, 1974).

Selon Choisnel, (1986) l'évaluation agro climatique à l'échelle régionale est une technique de zonage représentant une alternative à la cartographie de variables quantitatives disponibles en chaque point du réseau agro climatique. Ces variables peuvent être représentées sous forme de croisement de données climatiques, pédologiques et/ou phénologiques.

Dans ce chapitre nous présentons la situation des céréales et des blés durs en Algérie et la répartition des zones céréalières selon le contexte climatique. Aussi, on s'intéresse aux incidences des paramètres climatiques sur les blés, le rôle de l'eau et les phases phénologiques les plus critiques du développement du blé.

### **IV. 1. Le blé en Algérie**

---

En Algérie les surfaces réservées aux céréales au cours de ces 20 dernières années avoisinent les 2.7 millions d'hectares en moyenne dont 1.4 millions d'hectares sont occupés par le blé dur. La production est marquée par une stagnation sur une longue période. En effet il s'agit d'une culture surtout pluviale dépendante de la variabilité du climat (Baldy, 1974).

Dans un souci d'arriver à une amélioration des rendements pour atteindre des productions acceptables, l'Algérie a encouragé le recours à la technique de l'irrigation de complément, cette dernière permettrait de diminuer les effets d'aridité du climat dans les zones à cumules pluviométriques restreints, et de combler le déficit hydrique durant les périodes critiques. Cependant, la production du blé dur en Algérie n'a pas atteint dans les meilleurs des cas les 21 millions de quintaux sur une superficie emblavée et récoltée de 1 585 500 ha avec un rendement moyen de 12.8 q/ha en 1996 selon les informations fournis par le M.A.D.R.

Campagnes agricoles	Total céréales d'hiver			Blé dur			
	Superficie	Production	Rendement	Superficie	Taux de surface des blés par rapport à celle des céréales	Production	Rendement
	(ha)	(q)	q/ha	(ha)	%	(q)	q/ha
1984 /1985	3 238 970	28 802600	8,9	1086950	33,6	9 569 310	8,8
1985/1986	2 869 330	24 007670	8,4	977970	34,1	7 846 670	8
1986/1987	2 716 840	20 624090	7,6	994420	36,6	7 765 410	7,8
1987/1988	1 805 220	10 337410	5,7	665920	36,9	4 153 720	6,2
1988/1989	2 636 180	20 016 100	7,6	1009500	38,3	8 133 490	8,1
1989/1990	2 490 300	20 112 000	8	1020900	41	8 329 770	8,2
1990/1991	2 365 020	16 247170	6,9	1095120	46,3	8 330 560	7,6
1991/1992	3 238 970	28 802600	8,9	1086950	33,6	9 569 310	8,8
1992/1993	1 958 730	14 517720	7,4	972660	49,7	7 987 650	8,2
1993/1994	1 286 330	11 756830	9,1	683640	53,2	5 624 280	8,2
1994/1995	2 578 630	21 380000	8,3	1175860	45,6	11 886 700	10,1
1995/1996	3 663 001	49 000003	13,4	1585500	43,3	20 345 699	12,8
1996/1997	1 115 320	8 693400	7,8	590920	53,0	4 554 640	7,7
1997/1998	3 575 190	30252460	8,5	1707240	47,8	15 000 000	8,8
1998/1999	1 888 360	20200060	10,7	889090	47,0	9 000 000	10,1
1999/2000	1 056 870	9 318290	8,8	544470	52,0	4 863 340	8,9
2000/2001	2 401 810	26575340	11,1	1112180	46,0	12 388 650	11,1
2001/2002	1 844 460	19 514100	10,6	813890	44,13	9 509 670	11,7
2002/2003	2 900 820	42643740	14,7	1265370	43,62	18 022 930	14,2
2003/2004	3 000 000	40 313 000	13,4	1307590	43,5	20 017 000	15,3
2004/2005	2 349 619	35 250465	15	1042894	44,39	15 687 090	15
2005/2006	2 692 785	39 766389	14,8	1250003	46	17000041	13,6
moyenne	2 667 066	24 667592	9,8	10 39956	43,6	10708451	9,5

Tableau IV.1 : Etat des superficies, des productions et des rendements en céréales et en blé dur en Algérie durant la période (1985-2005)

Source : MADR (2007).

Le tableau IV.1 montre l'état des superficies, des productions et des rendements des céréales et des blés durs en Algérie durant la période (1985-2005). A travers les informations fournies on fait ressortir deux périodes importantes :

-1) période allant de 1984 jusqu'à 1994, caractérisée par des rendements moyens ne dépassant pas aux meilleures années (1984 et 1991) les 8,8 q/ha, aussi par des superficies plutôt stationnaires ne dépassant pas les 1095120 ha ce qui a induit à une situation d'années très peu productives en blé dur;

-2) période allant de 1995 jusqu'à 2006, caractérisée par un rendement moyen ne dépassant pas aux meilleures années (2003 et 2004) les 15,3 q/ha. Par ailleurs, les superficies emblavées ont enregistré une nette augmentation par rapport à la période (1984-1994).

Le saut quantitatif enregistré durant la seconde période (1995-2006) en termes de rendement et en production restent toujours très insuffisant pour atteindre la sécurité alimentaire du pays.

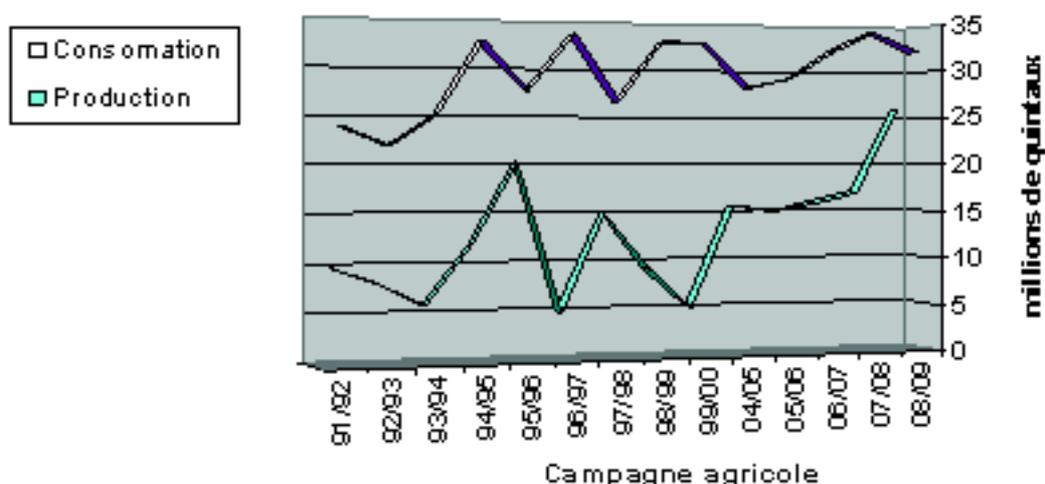


Figure IV.1 : Production et consommation de blé dur en Algérie durant la période 1991- 2009 (CIC, MADR, 2010).

Dans cette situation l'Algérie est forcée d'importer des quantités importantes de blé pour combler le déficit et satisfaire la demande croissante pour la consommation de cette denrée alimentaire, vu aussi le niveau de vie qui s'est légèrement amélioré par rapport aux années précédentes. L'Algérie importe en moyenne près de 2.7 millions de tonnes des blés dont près d'un million et demi de tonne de blé dur (figures IV.1).

## IV.2. Répartition des zones céréalières en Algérie

Les cultures céréalières sont pratiquées sur l'ensemble du territoire national avec une prédominance au niveau des zones telliennes, en rapport avec les pratiques culturales qui classent ces cultures en fonction des traditions et du paramètre pluviométrique (Seltzer, 1949 ; Baldy, 1974). Il existe des facteurs intrinsèques et extrinsèques qui influent sur la répartition des cultures pluviales :

- l'effet de la variabilité des précipitations ;
- l'effet des sécheresses aléatoires et imprévisibles ;

- l'effet des stress environnementaux qui interviennent dans le développement des cultures durant leurs cycle en corrélation directe avec les principales conditions naturelles (localisation, géomorphologie, altitude, position géographique et sols) (Smadhi, 2002).

En méditerranée occidentale, cinq zones d'adaptation des cultures de blé peuvent être distinguées en se basant sur la pluviométrie (Baldy, 1992) :

- Les régions très pluvieuses. Elles reçoivent plus de 800 mm/an en moyenne ; l'excès des pluies d'hiver provoque des engorgements des sols, quand ils sont mal drainés. Le rendement du blé en est d'autant plus affecté que les pluies sont plus faibles au printemps. On trouve généralement peu de céréaliculture dans ces zones, et surtout du blé tendre ;
- Les régions pluvieuses. Elles se situent entre 500 et 750 mm en moyenne. Les années où les pluies de printemps sont satisfaisantes, la situation est favorable, car les besoins en eau sont bien assurés pour des variétés adaptées. Si les pluies d'automne sont trop faibles, les semis sont effectués trop tard et les blés expriment difficilement leurs potentiels de rendement dépendant du type du sol, de la situation en vallée ou en flanc de pente et du régime thermique hivernal jouant alors des rôles importants ;
- Les régions à pluviométrie limitée. Elles sont situées entre 350 et 500 mm en moyenne. Les situations locales peuvent devenir inférieures aux besoins en eau. Le choix de techniques et de successions culturales, mais aussi des variétés adaptées, devienne essentiels. Les blés durs peuvent avoir leur place, mais l'orge est plus adaptée à ces situations ;
- Les zones à faible pluviométrie ; reçoivent moins de 300 mm et ne peuvent produire des céréales qu'à l'aide de techniques permettant l'accumulation des pluies sur une partie des surfaces. Les effets de certains éléments « secondaires » du climat peuvent devenir prédominants : brumes ou rosées, hivers très doux permettant l'emploi de variétés à cycles très courts. Ces zones sont aussi marginales pour la céréaliculture. Sans irrigation, l'orge à cycle court constitue la moins mauvaise solution pour les agriculteurs, qui peuvent aisément les faire pâturer en cas de stress hydrique trop grand ;
- En dessous de 250 mm, la céréaliculture n'est plus possible sans irrigation.

Les limites pluviométriques des zones dites à potentialités céréalières sont comprises entre les isohyètes 350 mm et 600 mm (Seltzer, 1949).

Cependant, la localisation géographique et la diversité des facteurs de l'environnement (pente, relief, exposition) font que le climat peut présenter des dimensions, non seulement spatiales, mais aussi temporelles, donc il peut exercer un effet très distinct sur le fonctionnement des cultures au cours de leurs cycles phénologiques dans le temps. Aussi, on ne peut référer la variation des rendements seulement à un paramètre climatique, il est fréquent qu'un ou plusieurs paramètres interviennent dans la fluctuation des rendements.

Selon Feliachi, (2000) il existe trois espaces agro écologiques recevant une pluie moyenne supérieure à 350 où les cultures céréalières peuvent se développer sans beaucoup de problèmes liés aux précipitations (tableau IV.2).

**Tableau IV.2 : Répartition de la superficie céréalière en fonction des pluies**

Précipitation (mm)	> 600	600-450	450-350	350-300	< 300	Irrigation totale
Superficie (ha)	64.000	850.000	1400.000	480.000	350.000	35.000 traditionnelle, 10.000 sous pivot
Superficie total (ha)	3.144.000					45.000
Localisation	Plaines littorales, sub-littorales et le Nord des hauts plateaux		Sud des hauts plateaux	Ecosystème fragile		Sahara

Source : Feliachi (2000)

En général, il est difficile de mettre en place une répartition des zones céréalières à défaut de disponibilité de données climatiques, car ces dernières proviennent particulièrement de stations d'aérodromes (donc de plaines) ou de villes (aux microclimats très modifiés par l'homme). Quand l'analyse est possible, on constate à quelques kilomètres de distance, des écarts de près de 20% entre un piémont exposé aux vents pluvieux et un aérodrome en fond de vallée. Par ailleurs, si la pluie médiane (c'est-à-dire observée un an sur deux) croît de 300 à 400 mm, on passe d'une céréaliculture marginale à une zone de production céréalière intéressante.

### **IV.3. Incidences des paramètres climatiques sur le blé dur**

Le climat joue un rôle primordial pour le développement du blé. Mais aussi parfois s'oppose à leurs croissances et à leurs développements, car les facteurs climatiques peuvent agir de façon directe sur la physiologie du végétal.

#### **IV.3.1. Précipitations**

Bien que la pluie soit indispensable pour la plante et pour la production d'une terre, néanmoins, les dégâts causés au végétal par l'excès ou le déficit des pluies ne sont pas à négliger.

Le manque de pluies conduit à la baisse du rendement. Le seul facteur du milieu couramment capable d'empêcher une culture bien conduite d'atteindre un rendement convenable est la sécheresse, surtout sur un sol peu profond (Lafarge, 1986).

Les précipitations sous leurs formes solides (neige et grêle) peuvent avoir de mauvaises influences sur le végétal. La neige protège du froid, mais un manteau neigeux épais et de longue durée a des conséquences néfastes pour la végétation. En effet, les cultures des céréales (blé et orge) subissent des pourrissements.

Les plantes ont des stades critiques vis-à-vis du déficit en eau au pas de la période de leur développement. Pour le maïs, un manque d'eau peut entraîner une baisse de rendement pouvant atteindre 50% (Lafarge, 1986). Aussi pour le blé, un excès d'eau pendant la floraison peut se manifester par la coulure (mauvaise fécondation des fleurs).

Le déficit pluviométrique peut engendrer des pertes de rendement sur cultures pluviales à n'importe quel stade de développement du blé. Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), en région méditerranéenne, la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement, qui varient de 10 à 80% selon les années (Nachit et al., 1998 in Semcheddine, 2009).

#### **IV.3.2. Température**

Les températures varient considérablement autour du bassin méditerranéen, en fonction de l'éloignement de la mer (l'effet de continentalité est très marqué).

Dans les régions des hauts plateaux, l'action de la température sur la croissance du végétal est spécifique. Il a été observé que l'explosion de la pousse du blé au printemps n'est pas liée aux caractéristiques du couvert végétal mais à une augmentation rapide des températures (Duru, 1986). Une autre spécificité très importante est celle de la conséquence des basses températures au printemps qui limitent la vitesse de croissance. En effet, il a été constaté que généralement les céréales présentent des limites vis-à-vis de ce paramètre, lorsque la température moyenne ne dépasse pas 19 C°, le blé n'épie pas, alors qu'une bonne germination du blé nécessite une température minimale comprise entre 0 et 5 C°.

Les gelées hivernales affectent rarement les blés au dessus de 1000 mètres, les années où le froid survient sans enneigement des sols. La plupart des blés cultivés ont une résistance limitée au froid, mais les parties endommagées sont généralement remplacées par des talles plus tardives, l'inconvénient majeur sera un retard du développement de certains cultivars ( Baldy, 1993).

De plus, les températures élevées agissent aussi sur le développement des blés :

- - En cas de semis précoce, la levée peut être trop rapide, et un déséquilibre se crée entre la partie aérienne (croissance trop rapide du coléoptile) et souterraine (développement insuffisant des racines séminales, qui ne parviennent pas à assurer l'alimentation en eau des plantules) ;
- - Pendant la montaison, de fortes chaleurs supérieures à 30 C° sont généralement peu à craindre. Cependant certaines années, les températures sont élevées, et le rythme de développement de blé en sera fortement accéléré ;
- - Après la floraison, les fortes températures ont des effets défavorables sur le développement du grain. En effet, des températures supérieures à 30 C°, ont des effets négatifs sur le transfert et le stockage des assimilés et de la qualité des grains. C'est le phénomène de l'échaudage.

D'après Duru, (1986) un réchauffement climatique de l'ordre de 3°C pourrait entraîner une contraction des zones naturelles de végétation à cause de l'aridité et une légère montée des étages de végétation avec une décroissance de la productivité.

On peut dire qu'une résistance suffisante au froid hivernal, pendant le tallage et le début de la montaison, puis une floraison relativement tardive et une maturation rapide, constituent des atouts importants pour obtenir un rendement régulier des blés en climat méditerranéen semi-aride, particulièrement en altitude (Baldy, 1993)

### **IV.3.3. Evapotranspiration**

L'évapotranspiration représentant la demande climatique est reliée de façon étroite, voire fonctionnelle aux éléments du climat à savoir : la température, l'humidité, le vent, et le rayonnement. L'évapotranspiration est un phénomène complexe qui résulte non seulement de processus physiques tels que les changements d'état de l'eau, de la diffusion moléculaire ou turbulente de vapeur d'eau, mais aussi des incidences biologiques comme la régulation stomatique, la surface foliaire ou le développement de racines (Wardlaw, 2002).

### **IV.3.4. Humidité de l'air et le vent**

L'humidité de l'air et le vent sont considérés comme des paramètres régulant l'ETP, car une diminution du pourcentage de l'humidité dans l'air associe à une augmentation de

la vitesse des vents entraînant aussi à une augmentation de la demande climatique. Par ailleurs l'humidité associée à des températures ambiantes favorables génèrent des conditions favorables pour l'installation de maladies qui se créent, en particulier, les maladies cryptogamiques spécifiques aux céréales (Brown et *a.*, 1985).

Les vents peuvent aussi causer des accidents mécaniques au niveau des champs de cultures des céréales résumé dans la verse, en plus ils jouent un rôle de vecteur de transmission de maladies cryptogamiques, voire aussi des vols d'insectes.

#### **IV.3.5. Les occurrences climatiques**

Les occurrences climatiques sont représentées par les grêles, les rosées, et les sirocco.

- Grêle : son action est surtout mécanique, les dégâts sont importants pendant les stades de floraison et maturation ;
- Rosées : son action est bénéfique sur les végétaux en matière de minimisation de l'ETP surtout au levée du soleil, de plus leur contribution à l'alimentation en eau, par contre lorsque le blé atteint les stades compris entre épiaison et gonflement des grains, les risques de maladies augmentent, cause de la sensibilité de la plante à ces stades ;
- Sirocco : il est considéré comme néfaste pour le végétal son action est physiologique. Elle se définit par la transpiration très active lorsque les températures excessives apparaissent. Ces dernières ont pour conséquences un déséquilibre dans le développement des céréales au cours des deux phases sensibles d'épiaison et de maturation.

#### **IV.4. Rôle de l'eau**

---

L'eau est le constituant pondéral le plus important pour le végétale puisqu'il représente 60 à 80% du poids frais à la plante (Monneveux et Belhassen, 1996).

Tardieu *et al.*, (1995) considèrent que l'activité physiologique d'une plante est affectée dès que la teneur en eau diminue de 15 à 25% de la valeur maximale selon les espèces. Cette eau joue un rôle tampon entre la demande instantanée en eau dont la plante a besoin, et la quantité mise à sa disposition. Par ailleurs, l'eau permet à la fois de véhiculer les éléments nutritifs et leur absorption par la plante. Cette eau permet aussi la régulation de la transpiration qui est une fonction vitale chez la plante.

Selon Boyer, (1985) chez certaines espèces la quantité d'eau transpirée par jour à travers la feuille est de l'ordre de dix fois la masse de cette feuille :

- Une proportion maintient l'hydratation et la turgescence des cellules ;
- Une partie constitue le milieu réactionnel et sert de métabolite au cours de la photosynthèse ;
- Une autre partie infime participe à la composition des structures de la matière sèche. De ce fait, l'eau est un facteur principal limitant des rendements pour les 2/3 des superficies cultivées car elle influence de nombreux processus biologiques physiologiques essentiellement liés à la croissance et au développement des plantes. Donc l'eau est un élément déterminant de la distribution géographique de la végétation par espèce et par écotype, dont la notion d'adaptation au milieu.

## **IV.5. Périodes exigeantes en eau chez le blé**

---

Les besoins en eau d'une culture sont définis comme étant la quantité totale en eau utilisée par cette culture depuis sa mise en place jusqu'à la récolte.

Dans le cas du blé, les besoins en eau varient non seulement en fonction des conditions climatiques (température, vent,...), mais aussi selon les phases de développement de la culture. De ce fait plusieurs recherches ont été établies afin de déterminer les périodes de plus grande sensibilité au manque d'eau.

Bien que le blé ait des besoins continus en eau, il existe des périodes critiques où il doit consommer des quantités importantes en eau, car un déficit hydrique survenant au cours de ces périodes provoquerait des chutes considérables des rendements.

### **IV.5. 1. Semi levée**

Pour germer, le grain doit absorber 20 à 25% de son poids (Boyeldieu, 1981),

Cette phase est très sensible au stress hydrique.

### **IV.5.2. Levée tallage**

Cette phase est très sensible au stress hydrique. A cette période, les besoins en eau du blé sont de l'ordre de 25 à 30 mm, pour assurer son développement.

Le tallage est l'un des principaux facteurs déterminant du rendement en grains chez les céréales. Une carence hydrique précoce durant la phase végétative réduit le nombre et la taille des talles chez le blé (Harris et al., 1991).

### **IV.5.3. Tallage**

Il est préférable de provoquer un stress lors du tallage pour que la plante puisse développer un système racinaire profond capable de puiser l'eau des couches inférieures du sol mais un apport d'eau minime qu'il soit de l'ordre de 13 mm, au stade tallage affecte positivement les rendements (Semcheddine, 2009).

### **IV.5.4. Montaison épiaison floraison**

Varnet et al, (1967) affirment que durant toute la période de l'épiaison la consommation en eau est maximale.

Selon Moule (1980) les besoins en eau du blé sont assez faibles au tallage, mais ils deviennent considérables à la montaison et en fin de l'épiaison et peuvent atteindre les 180 mm.

Mouhouche, (1997), signale que la phase la plus critique au manque d'eau pour les céréales correspond à la période prés et post florale, qui dure 15 à 30 jours selon l'espèce, la variété et le mode de culture.

### **IV.5.5. Grossissement des grains**

Tiercelin, (1998) insiste sur l'importance de l'irrigation dans les 15 jours suivant la floraison, pour assurer une alimentation hydrique satisfaisante pendant la période de remplissage des grains, donc la plante a besoin d'eau à ce stade pour véhiculer les assimilés formés lors de la photosynthèse vers les graines.

## Deuxième Partie : Matériels et Méthodes

### CHAPITRE V : RÉGION D'ÉTUDE ET SON MILIEU NATUREL

#### Introduction

---

Afin de mettre en relief les caractéristiques de la région d'étude, il a été nécessaire de collecter le maximum de données de base, et de recenser quelques travaux effectués qui ont fait ressortir quelques caractéristiques de la globalité ou d'une partie de la région d'étude. En effet, les données de base nous ont conduit à recenser quelques études et cartes déjà existantes issues des travaux déjà entrepris auparavant qui ont fait ressortir les caractéristiques morphologiques, pédologiques, hydrologique, ainsi que les cartes de la couverture végétale, du réseau routier et urbain etc.

Par ailleurs, un travail d'investigation a été entamé afin de connaître les potentialités de production de blé à travers le temps et les cultures céréalières dominantes dans la région ainsi que les statistiques existantes sur les rendements des cultures.

#### V.1. Choix de la région d'étude

---

La région d'étude est choisie selon plusieurs critères, dont les plus importants sont :

- La région est historiquement considérée à potentiel céréalier surtout en culture de blé dur;
- La disposition de la région d'un réseau de stations météorologiques.

Notre étude s'intéresse à toute la région qui renferme du point de vue découpage administratif actuel neuf wilayas : Bordj Bou Arreridj, Sétif, Bejaia, Mila, Constantine, Oum el Bouagui, Khenchela, Tébessa et Batna. Nous pouvons dire que l'étude a porté sur la région connue pour sa vocation céréalière et son appartenance en majorité à l'étage bioclimatique semi-aride.

Le choix et la délimitation de la région suscitée sont basés essentiellement sur l'importance particulière que présente les grandes cultures notamment le blé dur. Cette spécificité conduit à étudier et à déterminer les limites nouvelles de la région selon les données climatiques actualisées des dernières vingt années, tout en tenant compte de la répartition des stations météorologiques et leur disponibilité en données le long de la période d'étude.

#### V.2. Situation géographique et limites naturelles

---

La région d'étude s'étend sur une superficie de 33610 Km<sup>2</sup> et présente un périmètre de 1872 Km. Elle se situe entre les longitudes X1= 4,2° ; X2= 8,3°, et entre les latitudes Y1= 35,00° ; Y2= 36,6° Est (figure V.1).

La région est limitée naturellement comme suit :

- Au Nord par les Monts de Constantine dont la hauteur la plus élevée atteint les 1285 m, et par Djebel Sidi Dris, 1363 m à Mila ;
- au Nord-Ouest, par la chaîne de Djurdjura dont le point culminant atteint 2308 m (Lala Khedîdja) ;
- à l'Ouest par les Bibans d'orientation Sud Ouest et Nord Est, il est caractérisé par une altitude relativement élevée (Djebel Takoucht, 1900 m ; Djebel Megress, 1737 m) dont le point culminant atteint 2000 m (Djebel Babor) ;
- à l'Est par les monts de Tébessa (Djebel Doukhane, 2349 m, et Djebel Bou Roumane, 2250 m) et la frontière tunisienne ;
- Au Sud par les Aurès (Djebel Mahmal) et par Djebel Zellatou, (1549 m).

### V.3. Morphologie du relief

---

Nous n'allons pas détailler l'aspect géomorphologique de la région d'étude, mais nous allons essayer de trouver des structures de paysages permettant d'expliquer en partie la répartition agricole des grandes cultures dans la région d'étude à travers la réalisation d'un M.N.T et d'une carte des pentes.

A cet effet, un M.N.T a été réalisé grâce à des outils et programmes informatiques, sur la base de cartes topographiques digitalisées existantes à l'échelle 1/200 000. La carte de base M.N.T nous a permis de faire ressortir les caractéristiques de la région et de concevoir une autre carte qui est celle des pentes. Ces cartes nous ont permis d'illustrer les principaux critères physiques, qui se distinguent par le relief, l'altitude et la pente.

Du point de vue morphologie du relief, la région d'étude se distingue par :

#### V.3.1. Les chaînes de montagnes

Les chaînes de montagnes dans la région d'étude sont essentiellement représentées par les Aurès au Sud qui comporte les monts qui représentent l'altitude la plus haute de la région dont le point culminant atteint 2169 m.

A la partie centrale, on rencontre les Monts du Hodna et ceux de Sétif dont les points élevés respectifs sont de l'ordre de 1688 m et 1737 m. Au Nord-Est dans la région d'étude ce sont les Monts d'Oum El Bouagui qui prédominent avec des altitudes qui atteignent 1700 m. A l'Est ce sont les Monts de Tébessa que l'on rencontre avec des altitudes avoisinant les 1470 m.

#### V.3.2. Les plaines

Les plaines sont représentées par des pentes très faibles (0 – 5%). Différentes plaines existent au sein de la région d'étude, elles correspondent à la plaine de Bordj Bou Arreridj, de Sétif et s'étendent jusqu'à la plaine de Oued El Othmania et la plaine d'El Khroub à Constantine. Cette extension représente la majeure partie des terres agricoles de cette partie de la région (Bahlouli et al 2008). Par ailleurs, d'autres plaines occupent la région, elles correspondent à la plaine de Mila au Nord de la région d'étude. Au Sud les plaines de Touffana et de Batna englobent à leur tour une bonne part des terres agricoles de la région d'étude (figures V.1 et V.2).

#### V.3.3. Les pentes

## Apport de la cartographie numérique sur l'étude de l'influence des précipitations sur la production du blé dur

La conception d'un M.N.T à base de cartes topographiques à l'échelle de 1/200 000 (figure V.2), nous a permis de concevoir une carte des pentes propre à la région d'étude, caractérisée par différentes classes (tableau V.1). Les pentes inférieures à 5 % représentent la superficie la plus importante de la région d'étude, elles occupent 88.48 % de la superficie totale de la région. En second lieu c'est les pentes comprises entre 5 et 10 % qui occupent 11 % de la superficie totale de la région d'étude. Par ailleurs, les pentes supérieures à 10 % représentent que 0.52 % de la superficie totale.

Tableau V.1 : Répartition des superficies par classes de pentes

Classes de pente (%)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage de surface de classe de pentes par rapport à la superficie totale
< 5	29738.13	88.48
5 – 10	3697.10	11
10 – 15	151.24	0.45
>15	23.53	0.07

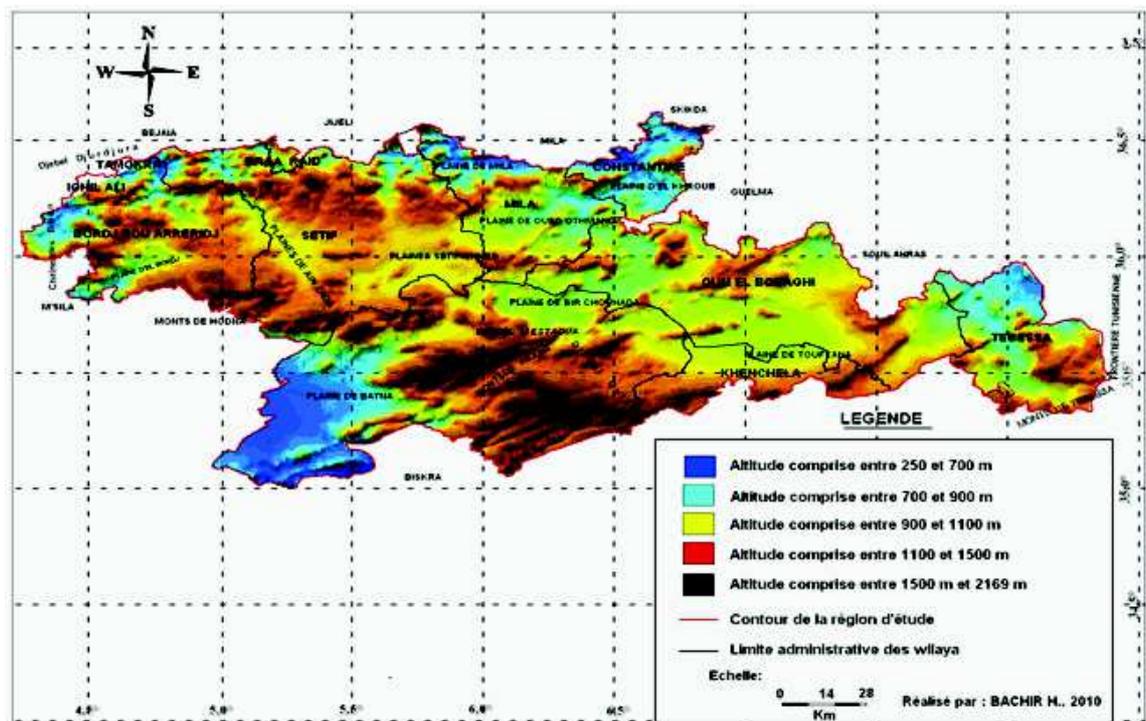


Figure V.1 : Modèle numérique du terrain de la région d'étude

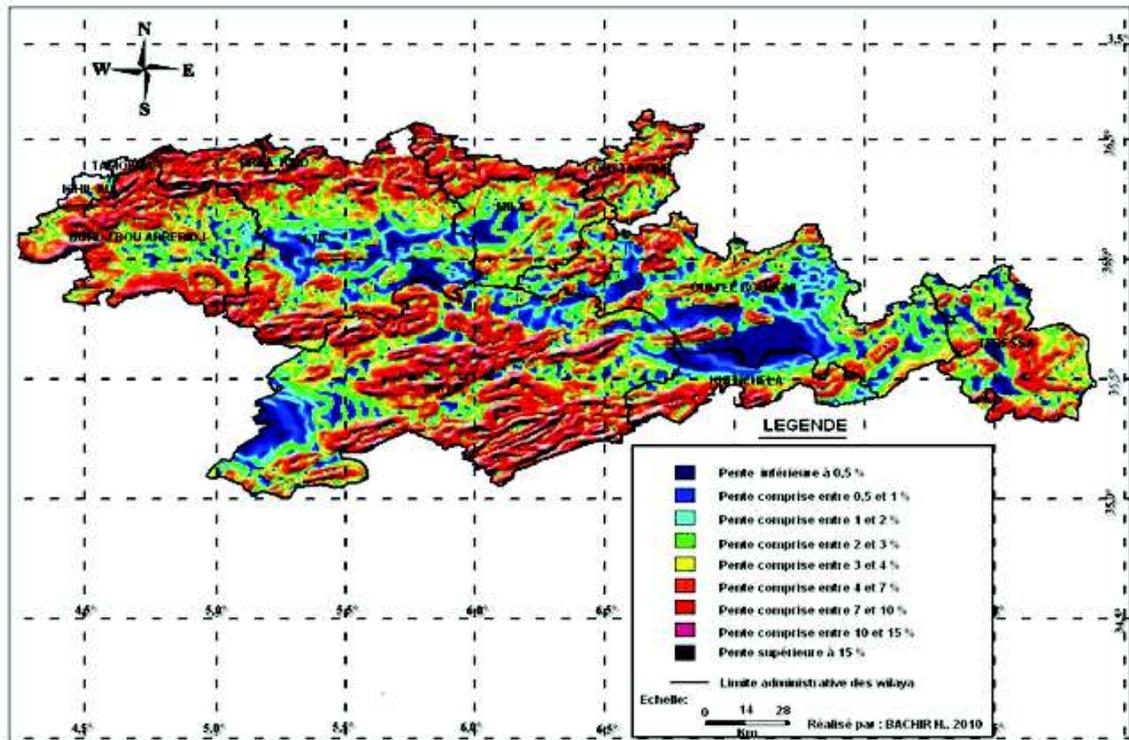


Figure V.2 : Carte des pentes d'orientation Nord-Sud de la région d'étude

#### V.4. Les sols

La carte des sols de la région d'étude réalisée par Durand (1974), fait ressortir plusieurs types de sols. La répartition des superficies par classes de sols (tableau V.2) montre la prédominance de trois classes de sols dans la région d'étude à savoir :

- **Les sols calciques** : ils représentent la plus grande partie des terres de la région. Ils sont caractéristiques des zones semi-arides à climat sec. Ils sont localisés au centre et au Sud et à l'Est de la région d'étude et ils occupent une superficie de 2583924,23 ha ;
- **Les sols calcaires** : ils occupent eux aussi une grande surface au sein de la région d'étude caractéristique des zones semi arides. Ils existent au Sud de la région vers Ain Oulman et le Sud d'El Eulma et d'El Bordj ;
- **Les sols calcaires humifères** : ils représentent environ 918311 ha.

**Tableau V.2 : Répartition des superficies par classes de sols**

<b>Classes de sols</b>	<b>Superficies en hectares</b>	<b>Taux de superficies</b>
Sols calciques	2583924,23	37,42
Sols calcaires	1090297,66	15,79
Sols calcaires humifères	918311,52	13,29
Roche mère	769904,65	11,15
Solontchak	502855,80	7,28
Sols alluviaux basiques	315004,26	4,56
Sols insaturés	244027,67	3,53
Sols calcaires et Solonetz	149748,95	2,16
Sols alluviaux	113712,48	1,64
Sols insaturés humifères	71183,04	1,03
Sols éoliens d'ablation	54702,33	0,79
Solonetz	28426,41	0,41
Sols Salins	27243,23	0,39
Sols éoliens d'accumulation	16273,44	0,23
Sols calciques et Solontchak	11174,19	0,16
Marais	7913,2	0,11

## **V.5. Hydrologie de la région**

---

### **V.5.1. Ressources en eaux superficielles**

La région d'étude est constituée par un ensemble de sous bassins versants, traversés par un chevelu hydrographique dense. L'alimentation principale en eau des cours d'eau est assurée par les oueds principaux issus des reliefs élevés qui entourent la région en particulier par le Nord (Djebel Lakhdar, Djebel Babor, Djebel Takoucht, et Djebel Errakas). En été, les débits de ces cours d'eau diminuent ou deviennent nuls dans certains cours d'eau, l'alimentation de ces derniers est assurée par les débits d'étiage à cette époque de l'année.

Les sources et les retenues colinéaires existantes en nombres négligeables, et si elles existent elles ne sont pas bien exploitées ou entretenues. Notons aussi, que la construction de petits barrages ou retenues destinés à l'irrigation reste en nombres limités, leurs majorités sont actuellement destinées à l'A.E.P. Cette situation contribue à la restriction des superficies céréalères irrigables.

Une carte représentative de la répartition du chevelu hydrographique, ainsi que le positionnement des puits, forages et barrage, sur la région (Figure V.3).

### **V.5.2. Ressources en eaux souterraines**

Les ressources en eaux souterraines restent insuffisantes pour couvrir les besoins en eau d'irrigation, vue l'importante superficie agricole de la région. Par ailleurs, d'après la D.H.A, la majorité des forages sont en arrêts car les potentialités des nappes ne sont pas connues en attendant la réalisation de l'étude spécialisée entreprise par les services concernés. En outre, la plus part des puits sont taris suite à la succession des années sèches.

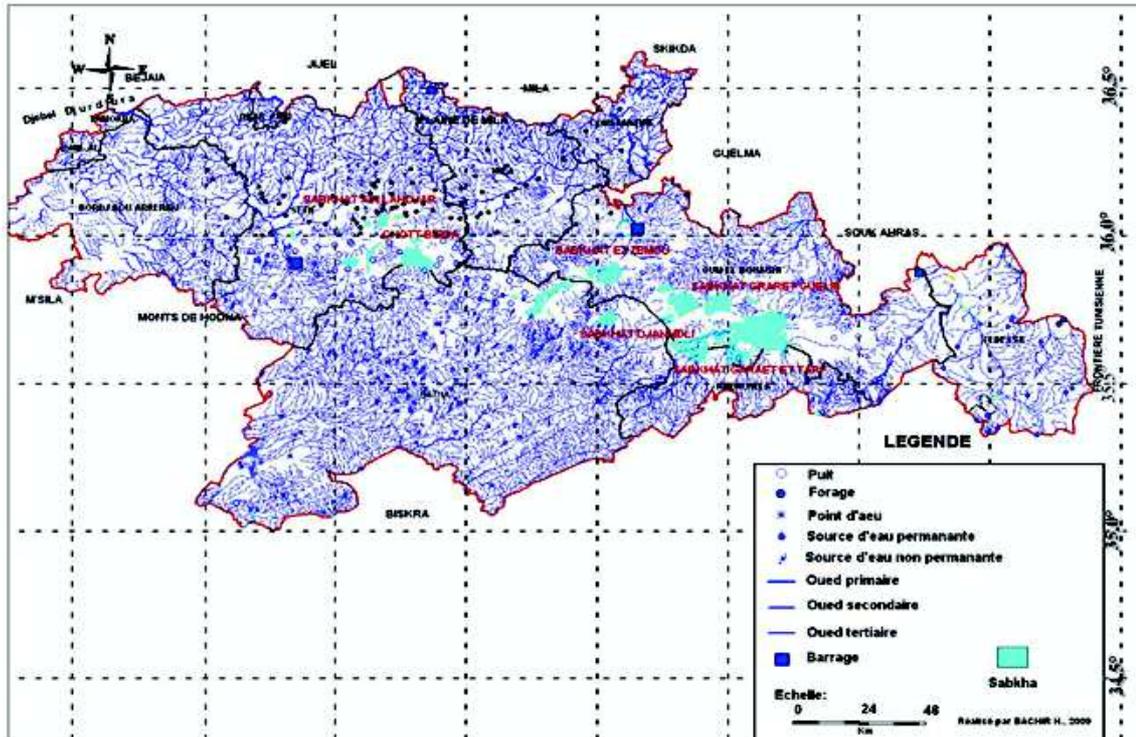


Figure V.3 : carte de la répartition du chevelu hydrographique et positionnement des puits, forages et barrages dans la région d'étude.

## CHAPITRE VI: APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

### Introduction

L'élaboration de ce travail repose sur quelques principes de bases. En effet dans ce chapitre nous présenterons et développerons les différentes méthodes et approches utilisées à savoir :

- la prospection et le recueil des données dans le contexte agropédoclimatique de la région d'étude ;
- les méthodes de traitements statistiques ;

- les outils informatiques utilisés pour la réalisation des cartes numériques et des traitements numériques de données.

Le but recherché dans la prospection, le recueil et le traitement des données caractéristiques de la région d'étude, est de faire ressortir l'inter relation qui existe entre le facteur climatique (précipitations) et les autres facteurs géographiques ou naturels, afin de faire ressortir la nouvelle aire à potentiel céréalier selon les paramètres du climat et du sol.

## **VI.1. Prospection et recueil des données**

---

Les travaux de prospections et d'investigations sont nécessaires d'une part pour identifier les sources de données et d'autre part pour procéder au travail de sélection de données fiables et correspondantes à l'objectif de travail.

Il est capital d'utiliser une série de données dont la période est assez représentative en particulier pour toute donnée variable dans le temps (données climatiques). En ce qui concerne les cartes, le travail consiste à rechercher tout travail ou études pouvant aider à faire ressortir les caractéristiques géographiques et naturelles qui ont une relation directe avec les objectifs recherchés.

Dans le cadre de notre travail, la prospection et le recueil de données nous ont permis d'avoir une banque de données propres à la région d'étude. Cette banque se résume aux données et cartes représentés dans le tableau VI.1.

**Table VI.1 : Données recueillies correspondantes à la région d'étude**

Thématiques	Organismes fournisseurs	année	Echelles ou périodes
Données climatiques de quelques stations dans la région d'étude.	O.N.M	2007	1986-2006
Cumul pluviométrique au niveau de quelques stations.	A.N.R.H	2007	1986-2006
Fichier numérique des positions géographiques des puits, forage et barrages.	D.H.A	2004	_____
Carte des sols de la région d'étude (Durand).	E.N.S.A	1954	1/1000 000
Carte des précipitations annuelles de Chaumont et Paquin	E.N.S.A	1913-1938	1/1000 000
Carte de répartition spatio temporelle des précipitations annuelles (1986/2006)	I.N.S.I.D	2007	1913-1938
Carte topographique.	I.N.C.T	2001	1/200 0000
Carte du réseau hydrographique.	I.N.C.T	2001	1/200 0000
Carte des sebkhatés et talus.	I.N.C.T	2001	1/200 0000
Carte du couvert végétal.	I.N.C.T	2001	1/200 0000
Carte des réseaux routiers et bâtis.	I.N.C.T	2001	1/200 0000
Carte numérisée du découpage administratif.	I.N.C.T	2002	_____
Données des surfaces emblavées et productions céréalières série B.	M.A.D.R	2008	1986-2006

### VI.1.1. Données climatiques

Les données climatiques sont recueillies à partir des stations météorologiques professionnelles et auxiliaires appartenant à l'Office National de la Météorologie (O.N.M), et aussi à partir des stations pluviométriques appartenant à l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H).

Tenant compte des normes d'installation des stations météorologiques (couverture de 20 Km<sup>2</sup> en plaines et approximativement 2 Km<sup>2</sup> en zones de reliefs), nous pouvons dire que la densité de couverture de la région par les stations météorologiques est relativement faible ou inexistante dans la partie centrale et Sud de la région d'étude. Les stations climatiques faisant l'objet de l'étude sont collectées en majorité à partir de l'O.N.M.

Le travail de prospection nous a conduit en premier lieu à recenser 95 stations couvrant la région d'étude, mais le constat, nous a conduit à dire qu'au niveau de certaines stations, les périodes d'observation ou de fonctionnement sont très hétérogènes et varient d'une station à une autre.

Il est à noter que des lacunes d'observation apparaissent dans les différentes séries, aussi, le problème d'hétérogénéité temporelle des données au niveau des séries pluviométriques. L'objectif étant de réaliser des cartes thématiques à partir de données récentes et de préférence complète, nous avons retenus celles qui sont plus fiables au nombre de 65 stations (figure VI.1).

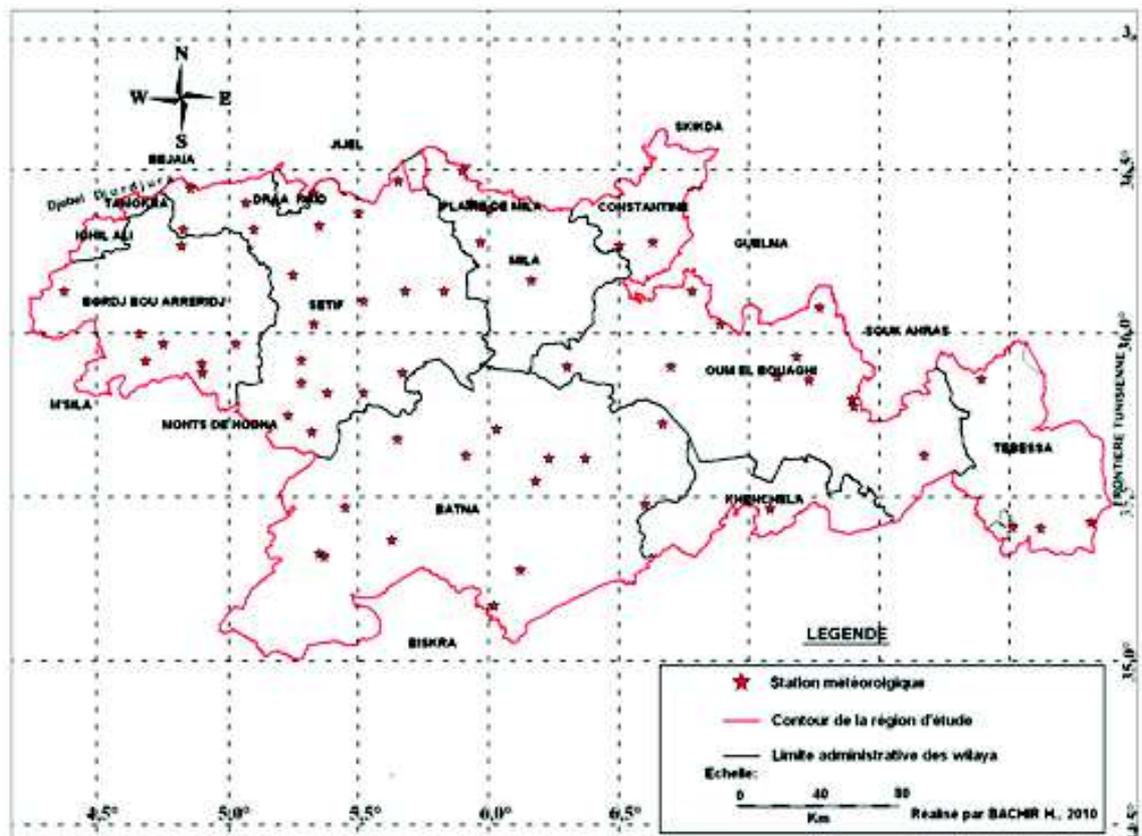


Figure VI.1. Localisation spatiale des stations climatiques retenues dans la région d'étude

Par ailleurs, il s'est avéré que la plupart des stations climatiques existantes dans la région d'étude, ne mesurent en général que le paramètre pluviométrie ; les autres paramètres sont essentiellement évalués par les stations dites professionnelles appartenant à l'O.N.M. On note aussi que ces paramètres sont aussi sujets à des lacunes au niveau des périodes mesurées ou choisies. Ainsi, cette situation pose problème pour constituer une banque de données climatiques, qui permet d'étudier l'évolution des paramètres climatiques à l'échelle d'une région et d'évaluer leurs impacts sur le milieu naturel.

#### VI.1.1.1. Analyses et critiques des données climatiques

En premier lieu, nous avons vérifié toutes les séries de données afin de procéder à des corrections des erreurs commises par les techniciens de l'enregistrement des données.

En second lieu, nous avons ordonné en colonnes les données mensuelles des stations A.N.R.H. comme celles de l'O.N.M., car ces dernières présentent les données d'une période chronologique propre à une station selon l'année calendaire, alors que l'autre présente les données à partir du mois de septembre. Ce réarrangement est essentiel, surtout pour homogénéiser notre banque de données. Afin d'injecter les données dans une banque de données uniforme et procéder à des traitements statistiques par la suite, il faut donc aussi homogénéiser les unités des données enregistrées de chaque établissement O.N.M et A.N.R.H.

#### VI.1.1. 2. Homogénéisation des données climatiques

Comme nous l'avons évoqué, les séries chronologiques des données climatiques propres à une station météorologique contiennent des lacunes, désormais, le recours aux méthodes d'homogénéisation est inévitable. Ces méthodes nous ont permis de combler les lacunes dans les séries recueillies, et d'écarter certaines stations qui présentent une hétérogénéité élevée dans leurs séries.

Il existe plusieurs méthodes permettant de combler les lacunes se retrouvant dans les séries climatiques, parmi ces méthodes, il existe celle de Rosenberg (1969), utilisées sur des données climatiques enregistrées en Palestine. Cette méthode a été reprise par Heusch (1970) au Maroc, ces auteurs ont utilisé cette méthode pour reconstituer les lacunes en prenant en considération la répartition des précipitations dans l'espace en fonction des facteurs climatiques, géographiques et topographique. L'équation est la suivante :

$$P = (a \times H) + (b \times D) + (c \times L) + (d \times l) + e^s$$

Avec P = Précipitations moyennes (mm) ;

H = Altitude (m) ;

D = Distance par rapport à la mer (Km) ;

l = Latitude (m) ;

L = Longitude (m) ;

s = pente du versant (%)

a, b, c, d, e = coefficients de l'équation de régression

Nous constatons que tous les calculs sont basés sur la méthode de la régression multiple. Cette méthode permet de rapprocher au mieux des séries de données appartenant à plusieurs variables considérées pour plusieurs stations.

D'autres méthodes sont utilisées pour combler les données manquantes à savoir :

**Méthode des rapports** : Selon Halimi, (1980) cette méthode prend en considération deux stations voisines dont l'une présente une série complète comme série de référence pour interpoler les valeurs manquantes de la série incomplète. La relation est de type ;

$$Pa = Pb \times \frac{Na}{Nb}$$

Avec Pa = Précipitation manquante ;

Pb = Précipitation de la station de référence ;

Na et Nb représentent les moyennes des périodes communes aux stations considérées.

Le principe est basé sur la comparaison des données au sein de la même série ou bien aux séries des stations voisines. Celles-ci sont comparées sur la base des caractéristiques des méthodes classiques statistiques ;

**Méthode de corrélation de type régression simple** : Cette méthode consiste à combler les lacunes existantes dans la série en utilisant la régression simple entre deux stations voisines dont l'une présente une série complète comme série de référence pour

interpoler les valeurs manquantes de la série incomplète de l'autre station. On détermine le coefficient de corrélation ainsi que l'équation de régression de la série complète qui nous aidera à reconstituer les lacunes existantes dans la série de la station voisine. Pour que cette méthode soit efficace, il faut que la régression soit linéaire, que le coefficient de corrélation soit élevé, et les variables confrontées suivent une loi normale (Halimi, 1980) ;

**Méthode d'interpolation** : Cette méthode consiste à reconstituer les lacunes au sein de la série climatique lorsque cette dernière ne contient pas assez de lacunes et la reconstitution du mois manquant se fait en tenant compte des valeurs des mois suivants et précédents le mois manquant par interpolation.

Pour le comblement des lacunes d'observations rencontrées dans les séries de précipitations nous n'avons pas opté pour la méthode utilisée par Rosenberg, mais nous avons utilisé les autres méthodes évoquées.

### **VI.1.2. Données géographiques et naturelles**

Une telle région considérée historiquement comme zone céréalière par excellence, possède des potentialités naturelles. Afin de faire ressortir les caractéristiques de la région, on a procédé à un travail de prospection et de recherche, pour trouver d'éventuelles données pouvant nous aider à faire ressortir les spécificités de la région. Nos recherches ont abouti à des cartes (tableau V.1) que nous avons digitalisés (numérisés) et sauvegardés dans des fichiers informatiques, afin d'effectuer des traitements par des logiciels de SIG.

## **VI.2. Démarche adoptée pour la cartographie des précipitations**

---

L'intérêt que jouent les précipitations sur le plan agronomique, nous laisse réfléchir d'avantage sur la méthode la mieux adaptée pour représenter les pluies sur le plan spatio-temporel. Les bases de données climatiques qui existent, ont fait l'objet d'une analyse cartographique dans le temps et dans l'espace.

Actuellement la densité du réseau climatique reste très faible. Seules les stations dites professionnelles ont mesuré l'ensemble des paramètres climatiques. Devant une situation de manque de données climatiques, et une faible représentation spatiale (station professionnelles), qui peut entraîner des erreurs voire des aberrations dans l'interpolation des données. La cartographie devient difficilement cohérente au sein de la région d'étude. Par ailleurs, seules les données des précipitations qui présentent une répartition suffisante au sein de la région d'étude, ont fait l'objet d'une étude cartographique.

La méthodologie adoptée consiste à exprimer la variable précipitation (P) en fonction d'une équation de régression multiple de type simple.

$$P \text{ (mm)} = a \text{ longitude} + b \text{ latitude} + c \text{ altitude} + d \text{ (constante)} + e \text{ (résidu)}$$

Avec :

a, b, c et d : paramètres de la régression multiple,

e : les valeurs des résidus (différence entre les données réelles et estimées des précipitations).

Le but recherché de cette régression, est de déterminer en n'importe quel point de la région d'étude les valeurs de précipitations, en remplaçant seulement les facteurs dans l'équation par les valeurs des facteurs du point à estimer. Cette étape, pour qu'elle soit réussie, nous avons entamé une réflexion sur la méthodologie et les outils qu'il faut

emprunter pour déterminer les paramètres de l'équation. Il a été décidé de réaliser quelques cartes qui servent de supports d'aide pour la réalisation des cartes de précipitations (M.N.T, la grille de points fictifs et les cartes des résidus de précipitations annuelles et mensuelles).

### VI.2.1. Grille de points fictifs

Afin de combler le déficit en stations pluviométriques dans la région d'étude pour réaliser une cartographie par krigeage, et en vu d'utiliser des modèles variographiques robustes, une réalisation d'une grille sur la région d'étude portant des nœuds représentant des stations fictives est nécessaire. Cette procédure n'a pas été faite aléatoirement mais suivant un échantillonnage régulier, avec un pas d'un maillage carré (15 km x 15 km). La Figure VI.2 montre la grille portant l'ensemble des points échantillonnés (155 points).

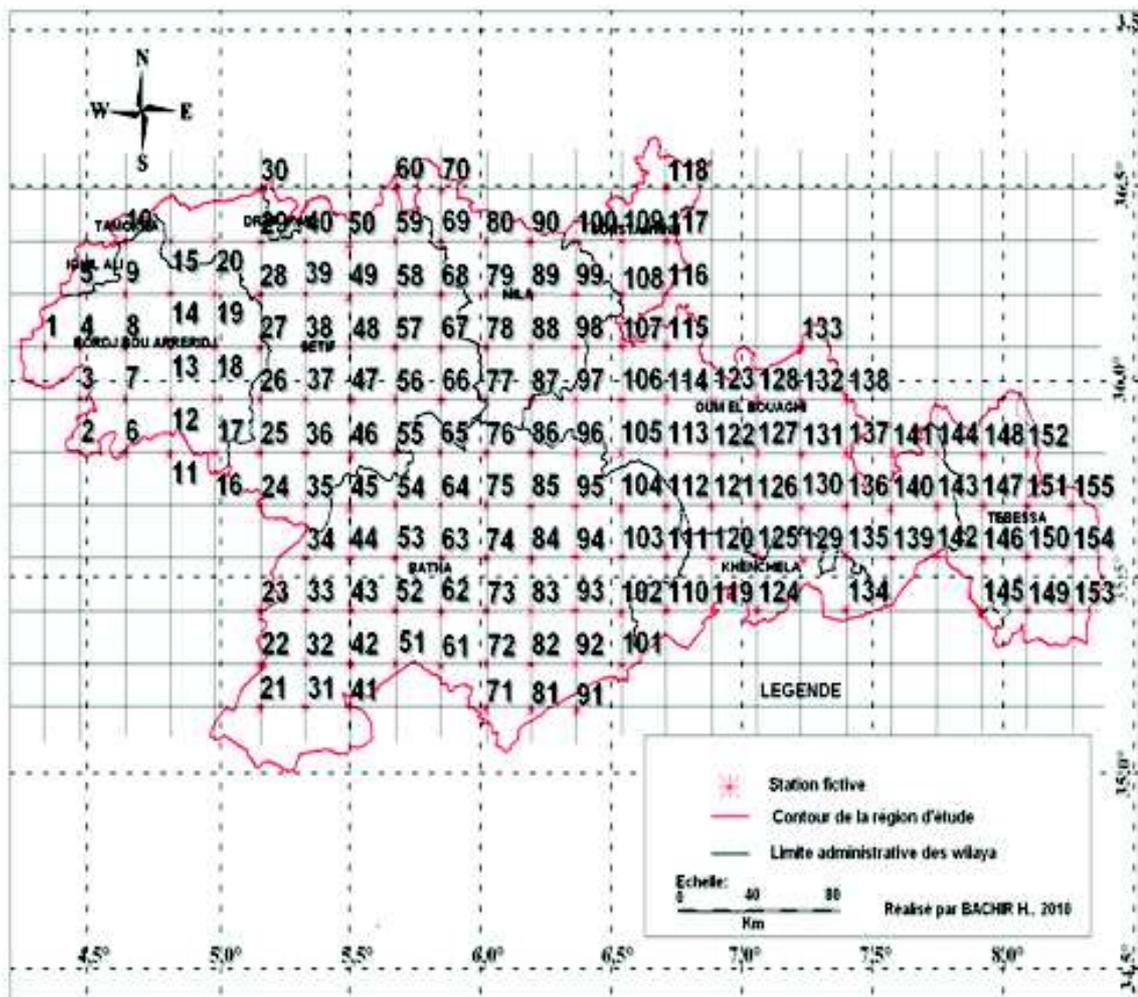


Figure VI.2 : Présentation de la grille de l'échantillonnage

### VI. 2.2. Modèle numérique du terrain (M.N.T)

La construction du M.N.T est établie, à partir des cartes topographiques numérisées (I.N.C.T., 2001). Nous avons transformé des courbes de niveau de la carte de base de la région d'étude en un ensemble de points géo référenciés, grâce à la fonction de création de grilles et de transformation des polygones en points par Vertical mapper.

Les points obtenus sont géo référenciés et représentés dans un tableau grâce à l'extracteur des coordonnées de MapInfo. Une fois cette opération achevée, on a recouru à l'interpolation par krigeage pour calculer les altitudes de la région d'étude et les représenter sous forme de pixels en palette de couleurs (Figure V.1).

Le M.N.T, sert à localiser et évaluer l'altitude de chaque point de l'espace de la région d'étude. Par ailleurs, il nous a servi pour déterminer les altitudes des points fictifs.

### **VI.2.3. Cartes des résidus**

La détermination des précipitations par le biais de l'équation de régression multiple, nécessite la connaissance des valeurs des résidus (e) des 155 points fictifs. C'est la raison pour laquelle, nous avons réalisé des cartes de résidus des précipitations interpolées par krigeage, à l'échelle annuelle et mensuelle, où il est possible d'estimer l'erreur de chaque point donné de l'espace de la zone d'étude.

Connaissant, la position géographique des points fictifs, leur altitude, et la valeur de l'erreur correspondante, on peut alors facilement estimer la valeur de la pluie en ce point.

### **VI.2.4. Etude variographique**

Connaissant, les valeurs de précipitations estimées correspondantes aux points fictifs, ces données sont analysées par les méthodes géostatistiques (étude de la structure des pluies) grâce au programme informatique Variowin (Pannatier 1998). Cette étape consiste à déterminer les types de variogrammes qui s'ajustent aux mieux aux variogrammes expérimentaux, et déterminer les paramètres des variogrammes. Ainsi, il sera déterminé l'I.G.F (Indicatif Goodness of Fit) qui est un critère de base pour le choix variographique. Par ailleurs, le type de variogramme, l'effet de pépite, la portée, le palier ainsi que le rapport d'anisotropie seront déterminés. Ces éléments du modèle ajustés sont utilisés dans la procédure de l'interpolation par "krigeage", afin d'aboutir aux cartes d'iso valeurs des pluies (isohyètes).

Le même cheminement est parcouru pour l'obtention de toutes les cartes de précipitations, annuelles et mensuelles. La démarche cartographique adoptée pour le paramètre précipitation, sont résumés dans l'organigramme (figure VI.3.).

## **VI.3. Carte des sols**

---

Une connaissance des types de sols existants dans la région d'étude est nécessaire pour connaître l'aptitude culturale du blé dur envers ces sols. L'indisponibilité des données et d'études récentes caractérisant les sols de la zone d'étude, nous a entraîné à retenir la carte des sols du Nord de l'Algérie réalisée par Durand (1974). Cette carte analogique a été numérisée afin qu'elle soit utilisée dans des différents traitements par SIG.

## **VI.4. Carte des pentes**

---

Pour déterminer la proportion des terres en pente de la région d'étude, une carte des pentes a permis d'avoir une vision globale des pentes de la région d'étude et déterminer grâce à l'outil SIG la proportion de la surface liée à une classe de pente bien déterminée (tableau V.1 et Figure V.2). Il est noté que la conception de la carte des pentes est établie à partir du M.N.T.

## VI.5. Carte de la nouvelle aire de production de blé dur

A travers la carte de la nouvelle aire de production de blé dur, nous avons déterminé les nouvelles limites des aires à potentiels de production de blé dans la région d'étude. Ces aires sont déterminées en fonction des exigences climatiques, pédologiques et morphologiques de la culture de blé dur.

Du point de vue pratique, la réalisation de cette carte se base sur la superposition de couches d'informations cartographiques. Chaque couche comprend une donnée synoptique spécifique à une variable (précipitation, pente, classes des sols, occupation des terres). La carte finale donne un aperçu des aires qui regroupent les meilleures conditions d'environnement pour une production de blé dur en pluviale.

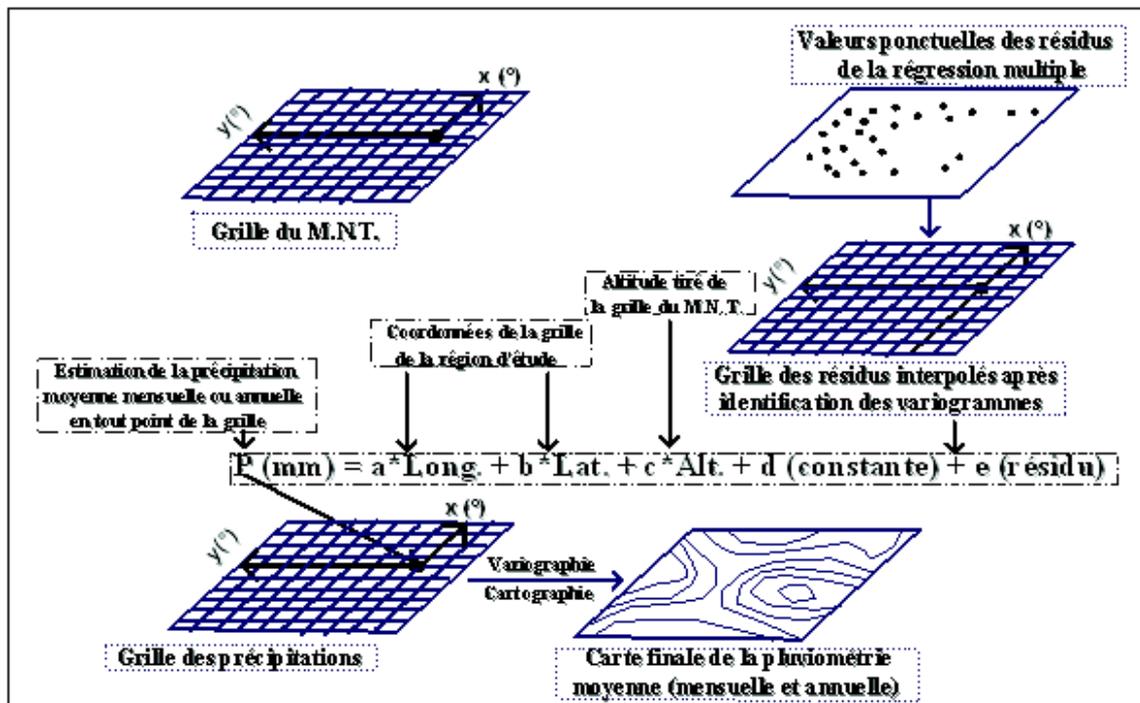


Figure VI.3 : Démarche adoptée pour la cartographie des précipitations

## VI.6. Vision globale sur les outils utilisés

Le recours aux nouvelles technologies informatiques tels que le S.I.G., est très important pour représenter une variable synoptique à l'échelle d'une région. La présente étude a nécessité l'utilisation de quelques outils cartographiques et SIG parmi lesquels :

- **Excel**, à l'aide duquel une étude graphique des paramètres climatiques étudiés a été faite ;

- **Statistica 5.1**, avec lequel nous avons calculé les différentes composantes de l'équation polynomiale des précipitations (les coefficients et les résidus);
- **Variowin 2.2**, à l'aide duquel nous avons pu obtenir certains résultats géostatistiques théoriques relatifs aux analyses variographiques du paramètre précipitation et les résidus ;
- **Surfer 8.01**: son utilisation vient après l'étude variographique. Ce logiciel de cartographie possède entre autre les fonctions Grid et Plot qui sont largement utilisées dans ce travail ;
- **MapInfo Professionnel 7.5**, est un logiciel qui est conçu pour fonctionner dans un environnement Windows. Nous l'avons utilisé pour accéder à quelques fonctions (géo référencement, digitalisation, nettoyage, superposition de couches d'informations et présentation);
- **Vertical Mapper 3.0** (Northwood Technologies and Marconi Mobile Limited, 2001), est un logiciel construit de telle façon qu'il soit conformément opérationnel avec le programme MapInfo. Il nous a permis de réaliser un M.N.T. par interpolation par krigeage, de plus à l'application de certaines opérations sur ce modèle obtenu.

## **VI.7. Résumé des étapes retenues**

---

Les différentes étapes suivies pour la réalisation de cette étude, reposent essentiellement sur la collecte et l'étude d'un nombre important de données, cependant le traitement statistique et cartographique sont effectués grâce à des outils informatiques qui permettent de convertir ces données sous forme de cartes, tableaux et figures.

Les points suivants font ressortir les différentes grandes étapes suivies par ordre pour l'aboutissement des résultats finaux de ce travail :

- Détermination de types d'informations et leurs périodes selon les besoins ou de leurs disponibilités, ainsi que la détermination des établissements fournisseurs, afin de créer une banque de données ;
- Choix de la région d'étude selon la disponibilité de l'information et le pourcentage des terres emblavées par les céréales (zone céréalière) ;
- Comblement des données manquantes de toutes les stations jugées fiables et qui contiennent des lacunes ;
- Réunir toutes les cartes et figures déjà existantes;
- Délimitation de la région d'étude,
- Faire ressortir la relation existante entre les différents facteurs qui influent sur les précipitations grâce à la régression multiple ;
- Réalisation de l'étude variographique (géostatistique) des cartes des précipitations et des cartes des résidus des précipitations;
- Conception des cartes d'erreurs de la région en vue de déterminer les plages défaillantes du point de vue statistique et couverture du réseau des stations météorologiques ;
- Digitalisation de quelques cartes propres à la région d'étude; topographiques, hydrographiques,...etc. ;
- Conception du Modèle Numérique de Terrain grâce aux cartes topographiques de la zone d'étude ;

- Implantation fictive de stations géo référenciés selon une maille carrée, leurs altitudes sont connues grâce au l' M.N.T. ;
- Conception des cartes de précipitations annuelles et mensuelles, propres à la région d'étude, par le recours aux méthodes géostatistiques ;
- Faire ressortir l'impact des précipitations sur les rendements du blé dur ;
- Détermination de la nouvelle région potentielle de production de blé dur en superposant des couches d'informations (carte des précipitations annuelles, carte des sols, carte de la couverture forrestière).

# Troisième Partie Résultats et Discussion

## CHAPITRE VII : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Introduction

---

Dans ce chapitre on s'intéresse à reproduire les propriétés observées des champs de pluie, à travers les outils numériques de la simulation (régression multiple et géostatistique). Le résultat de la mise en oeuvre d'un modèle de simulation est de présenté un outil qui nous permettra d'estimer les précipitations en n'importe quel point de l'espace. Les cartes de précipitation de la région d'étude nous ont servies comme support pour connaître le comportement des précipitations dans la région et leur impact sur la production du blé dur.

Par ailleurs, nous présentons des graphes (histogrammes) permettant d'observer la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles des précipitations. Ainsi que, les composantes des équations de la régression multiple du paramètre précipitation et du coefficient de corrélation (R) des équations. L'analyse variographique sera également étudiée dans ce chapitre.

A la fin de ce chapitre nous de présenterons les cartes des précipitations annuelle et mensuelles propre à la région d'étude, ainsi que de faire ressortir les plages ou les aires potentielles pour la culture du blé dur en tenant compte des précipitations et du type de sols.

### VII.1. Etude des données de précipitations

---

L'importance des précipitations dans le développement de notre étude, nous a conduit à choisir la région céréalière qui dispose du maximum de stations de mesures de précipitations. Malheureusement, la réalité montre que pour de nombreuses stations de mesures présentent des lacunes qu'on trouve dans les séries d'observations, qui pour la plupart n'ont pas fonctionnés ou n'ont pas été relevées en particulier durant la période 1990- 2000. Cette situation de disponibilité de données nous a orienté vers l'analyse des précipitations de la période de 1986 à 2006 des stations au nombre de 65, disposant de données complètes et fiables.

#### VII.1.1. Comblement des lacunes

L'application des méthodes statistiques présentées dans les chapitres II et VI aux différentes séries de pluies permettent d'une part de combler les lacunes observées, d'autre part d'atteindre la même période pour l'ensemble des stations. Pour cela, nous avons choisi des stations de références de séries homogènes et continues pour des périodes assez longues. C'est le cas des stations pluviométriques de :

- Bordj ghdir (ANRH) située dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj qui est utilisée pour corriger les lacunes observées dans la station de Bordj Ghdir (ONM);
- Seggana située dans la wilaya de Batna qui a servie pour corriger les lacunes observées dans la station de O.S.Slimane;

- Medfoune située dans la wilaya de Oum El Bouagui qui est utilisée pour corriger les lacunes observées dans la station de Ksar Sbihi;
- Bir El Arch située dans la wilaya de Sétif qui a permis de corriger les lacunes observées dans la station d'El Eulma;
- Guellal située dans la wilaya de Sétif qui a servie pour corriger les lacunes observées dans la station d'Ain oulmane;

### VII.1.2. Description des données de précipitations

Il est utile de noter qu'il existe une variabilité des hauteurs de pluies annuelles et mensuelles. Pour cette raison, nous avons décrit les données de précipitations d'une façon individuelle.

Nous avons attribué des chiffres aux stations de la région d'étude pour les codifier (tableau 1 annexe 1), ce qui permettra pour une présentation pratique des stations dans des graphiques et une facilité dans l'interprétation (figure VII.1).

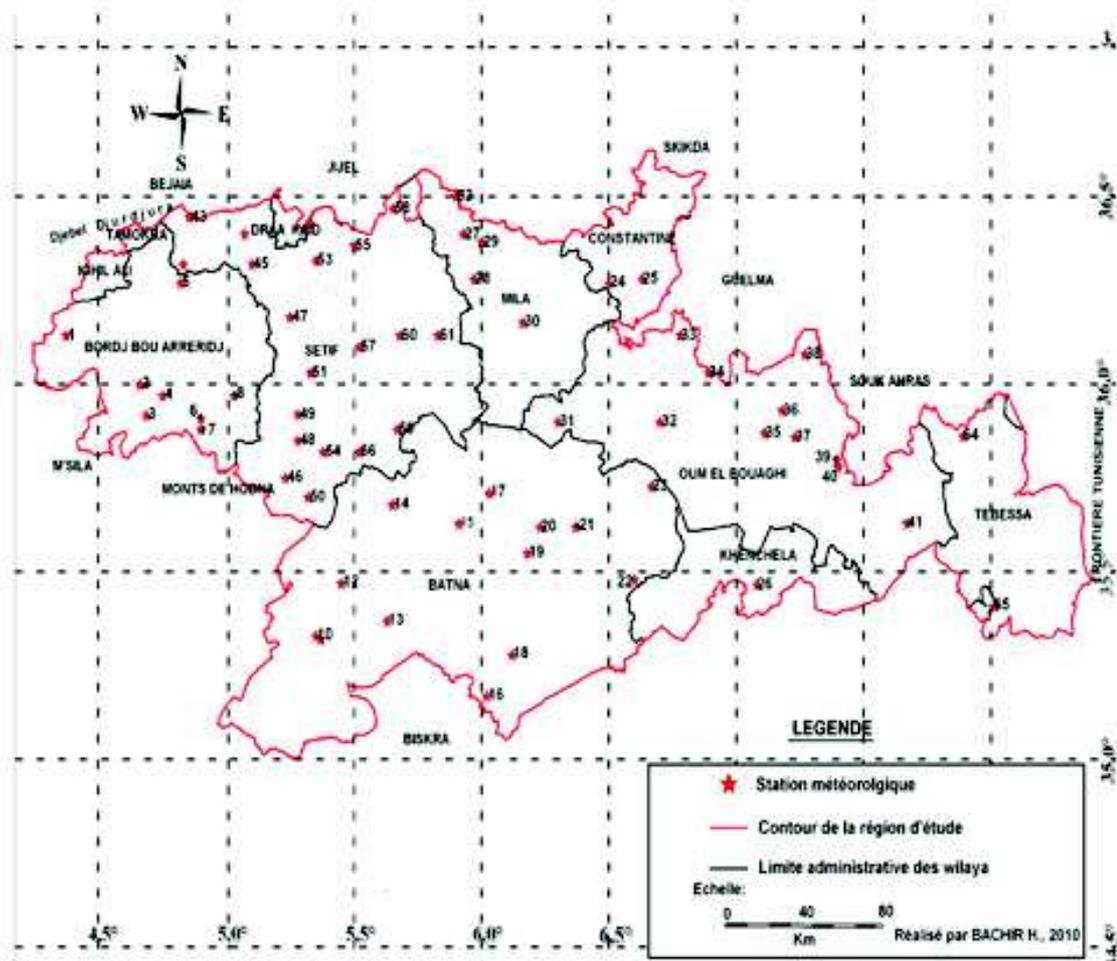
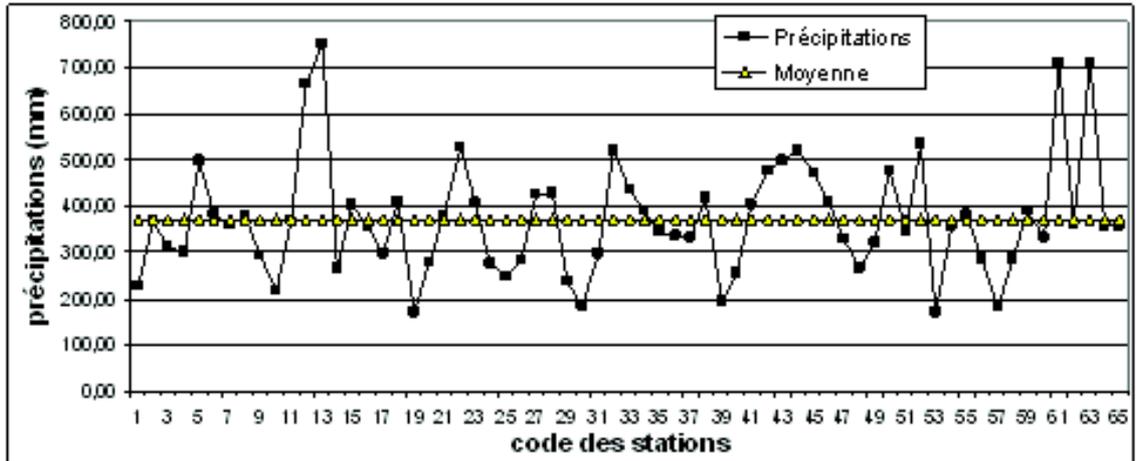


Figure VII.1 : Répartition des stations pluviométriques dans la région d'étude

#### VII.1.2.1. précipitations annuelles

Les hauteurs moyennes des précipitations annuelles observées dans la région d'étude au cours de la période choisie, pour les 65 stations sont portées sur la figure VII.2.

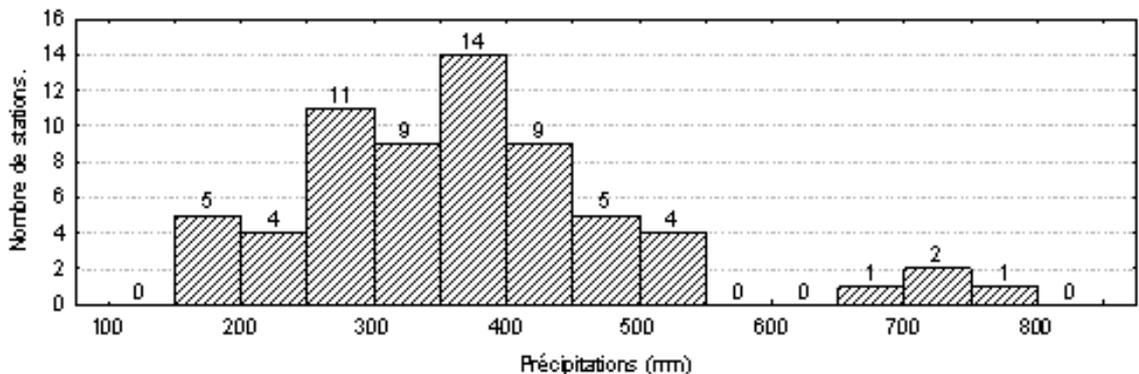
Les mesures des hauteurs des pluies de la période 1986-2006 relevées, au niveau du réseau pluviométrique retenu, ont montré que la hauteur des précipitations moyennes annuelles varie d'une façon considérable d'une station à une autre. Les hauteurs des précipitations moyennes annuelles de toutes les stations sont comprises entre 168,5 mm et 752,2 mm. La valeur la plus importante est relevée au niveau de la station de Seggana à Batna correspondant au code 13. La plus faible est enregistrée au niveau de la station Attouta à Batna correspondant au code 19.



*Figure VII.2 : Précipitations annuelles de l'ensemble des stations réparties sur la région d'étude période (1986-2006).*

En outre, par référence à la moyenne pluviométrique de la région  $P = 371,5$  mm, car il existe 36 stations pluviométriques qui enregistrent des hauteurs de pluies moyennes en dessous de la moyenne de la région, il s'agit des stations : 1, 2, 3, 4, 7, 10, 11, 14, 16, 17, 19, 20, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 35, 36, 37, 39, 40, 47, 48, 49, 51, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 62, 64 et 65.

La figure VII.3 fait ressortir la répartition des stations par classes de pluies. Il existe dans la région 14 stations avec des moyennes pluviométriques comprises entre 350 mm et 400 mm, il s'agit des stations suivantes : 2, 6, 7, 8, 11, 16, 21, 34, 54, 55, 59, 62, 64 et 65. Le reste des stations pluviométriques ont enregistré des cumuls pluviométriques moyens supérieurs à 400 mm.



*Figure VII.3 : Répartition des stations par classes de pluies annuelles*

### VII.1.2.2. précipitations mensuelles

Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles ont la même allure au cours de la période étudiée, pour quasiment l'ensemble des stations étudiées. Ces dernières affichent des périodes pluvieuses qui démarrent pour la plupart des années en mois de septembre et terminent en mois de mai ou juin.

Les moyennes pluviométriques mensuelles des mois de septembre, octobre et novembre correspondant aux premiers mois de l'année agricole sont pour la plupart faibles. Celles-ci n'excèdent pas aux niveaux des stations les plus pluvieuses, les moyennes de 55 mm, 46,5 mm et 85,6 mm respectivement pour les mois de septembre, octobre, Novembre.

Par ailleurs, il est à noter que la plupart des stations de la région d'étude enregistrent des hauteurs de pluies comprises entre 25 mm et 40 mm durant les premiers mois de l'année agricole à savoir 44 stations en septembre, 38 stations en octobre et 32 en novembre (figures VII.4, VII.5 et VII.6)

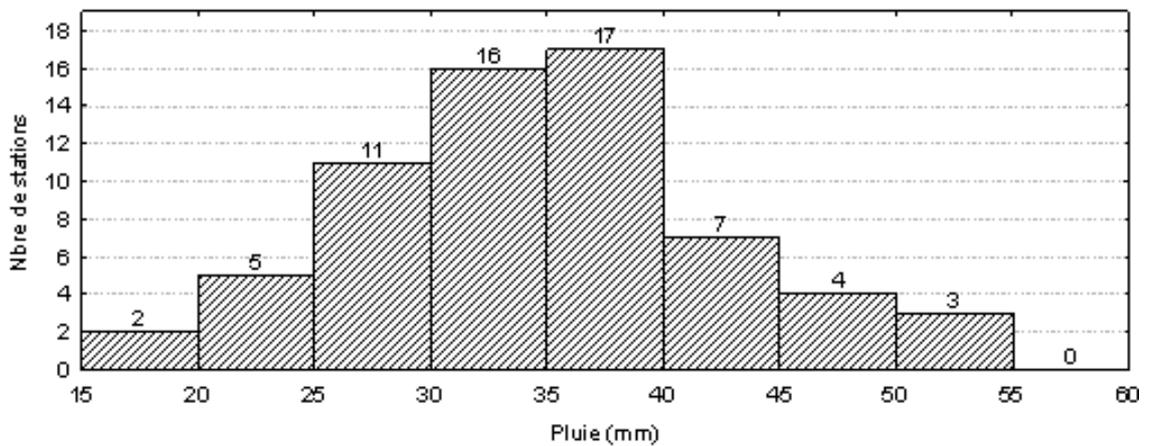


Figure VII.4 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de septembre)

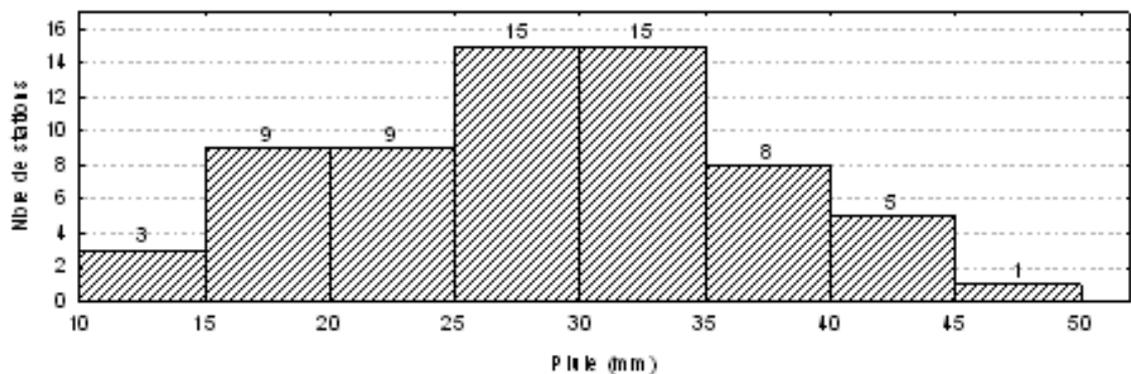


Figure VII.5 : Répartition des stations par classes de pluies (mois d'octobre)

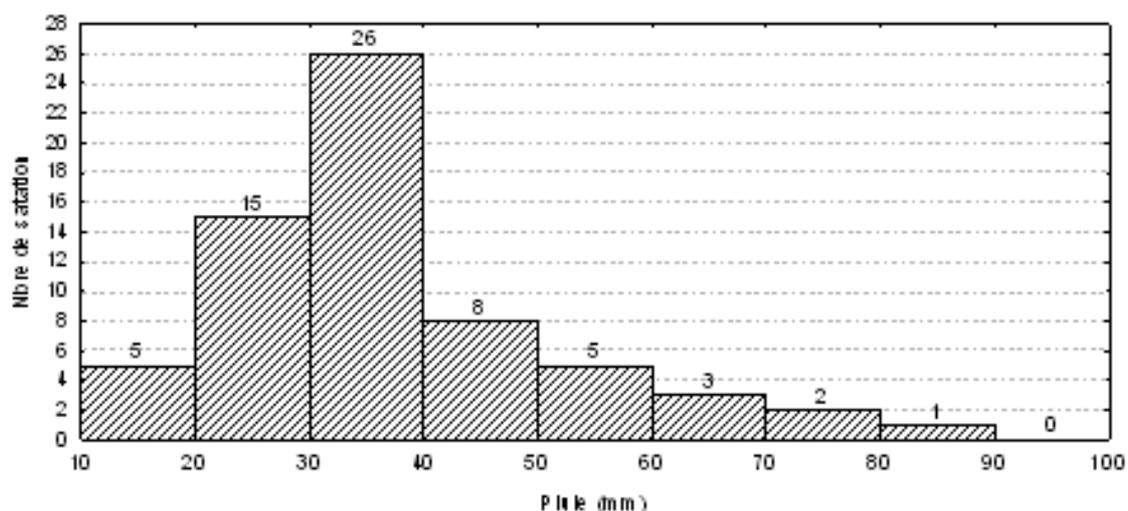


Figure VII.6 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de novembre)

Les hauteurs des précipitations moyennes restent les plus élevées durant les mois d'hiver (décembre, janvier et février). Celles-ci atteignent les maximums aux niveaux des stations les plus pluvieuses 163 mm, 121,5 mm et 104,6 mm respectivement pour les mois de décembre, janvier et février. Ces valeurs maximales sont enregistrées respectivement aux niveaux des stations 61, 54 et 13. Le mois de décembre est le mois le plus pluvieux de l'année, avec des moyennes comprises entre 40 mm et 60 mm dans 19 stations et des moyennes comprises entre 120 mm et 140 mm dans 3 stations pluviométriques. Par ailleurs le mois de février est le mois le moins pluvieux de la saison hivernale (figures VII.7, VII.8 et VII.9). Les stations les plus pluvieuses sont celles situées dans la région centrale nord de la région d'étude.

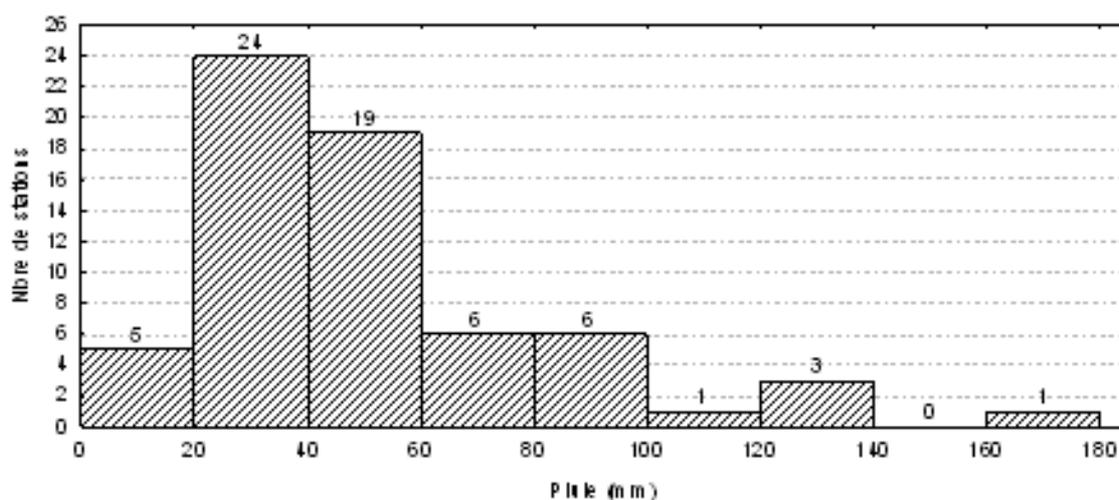


Figure VII.7 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de décembre)

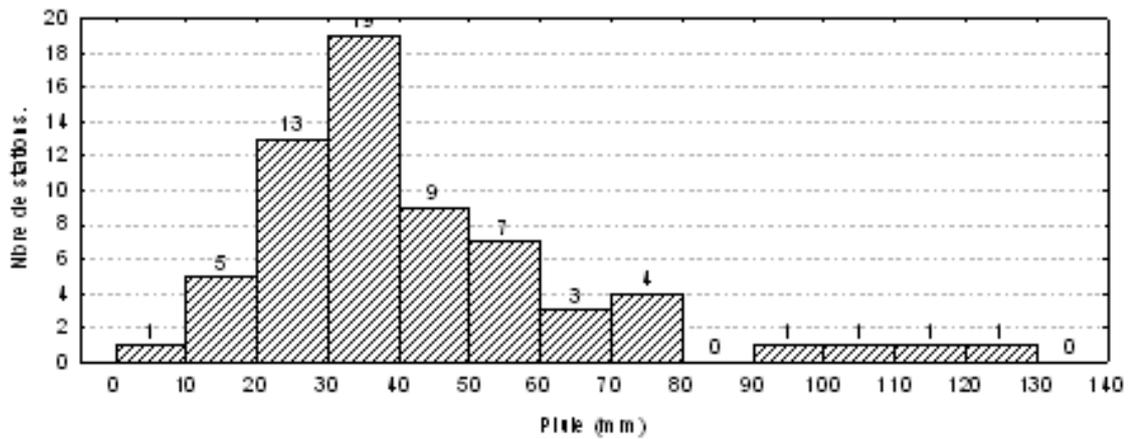


Figure VII.8 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de janvier)

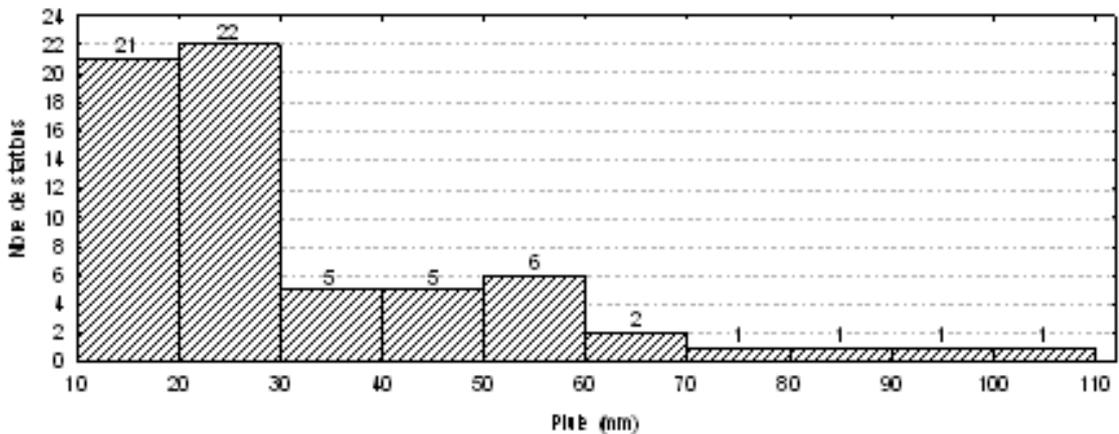


Figure VII.9 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de février)

En revanche, les cumuls pluviométriques moyens mensuels de la saison printanière sont faibles à l'exception du mois de mai où les cumuls pluviométriques de quelques stations sont acceptables (figures VII.10, VII.11 et VII.12)

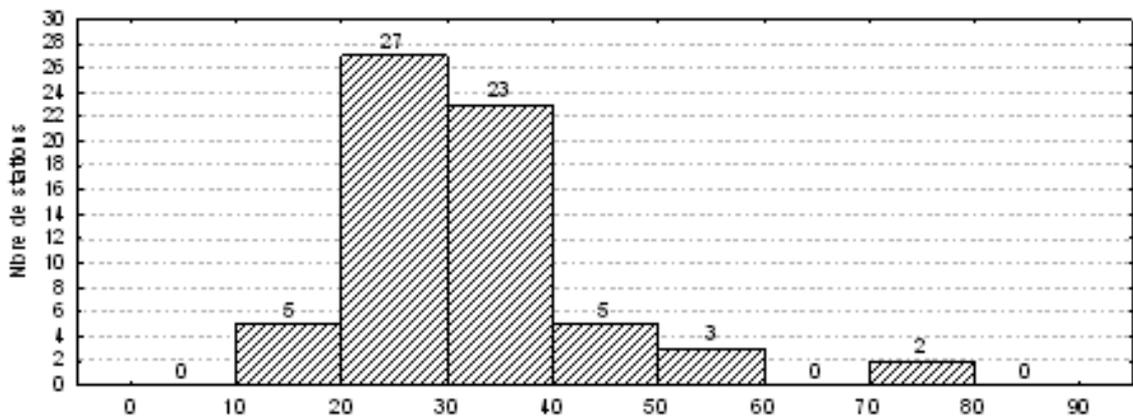


Figure VII.10 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de mars)

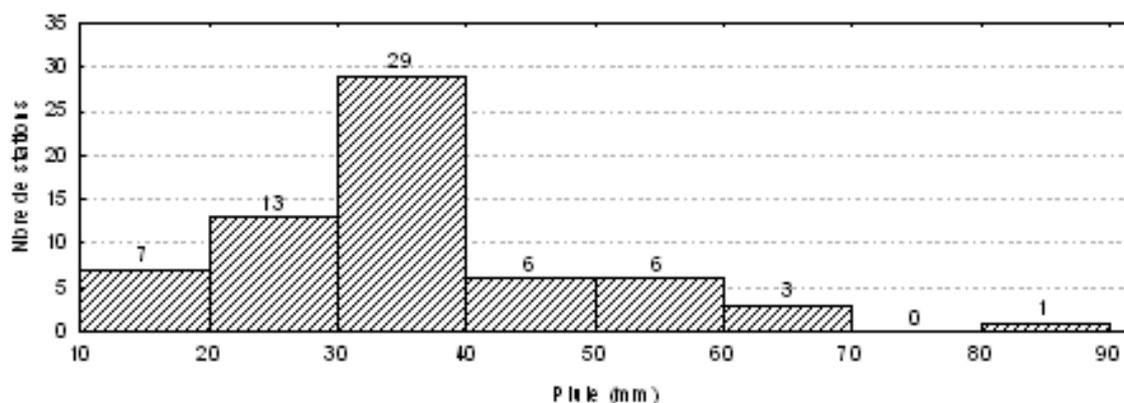


Figure VII.11 : Répartition des stations par classes de pluies (mois d'avril)

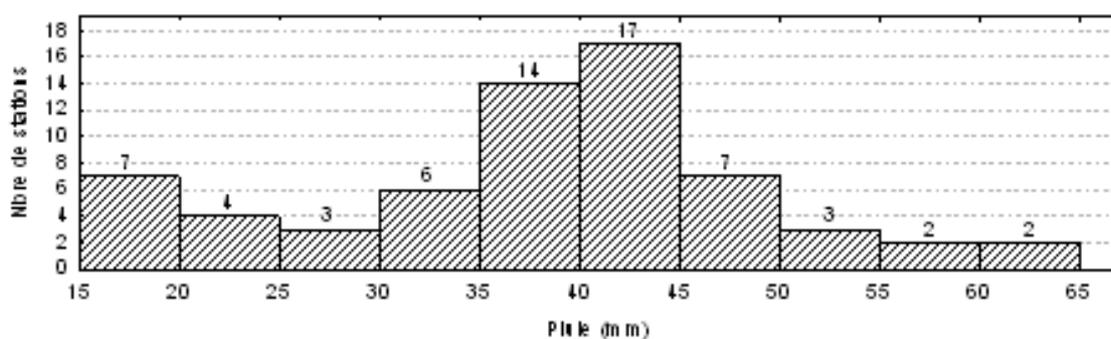


Figure VII.12 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de mai)

A partir du mois de juin les pluies deviennent très faibles pour devenir insignifiantes en juillet et août.

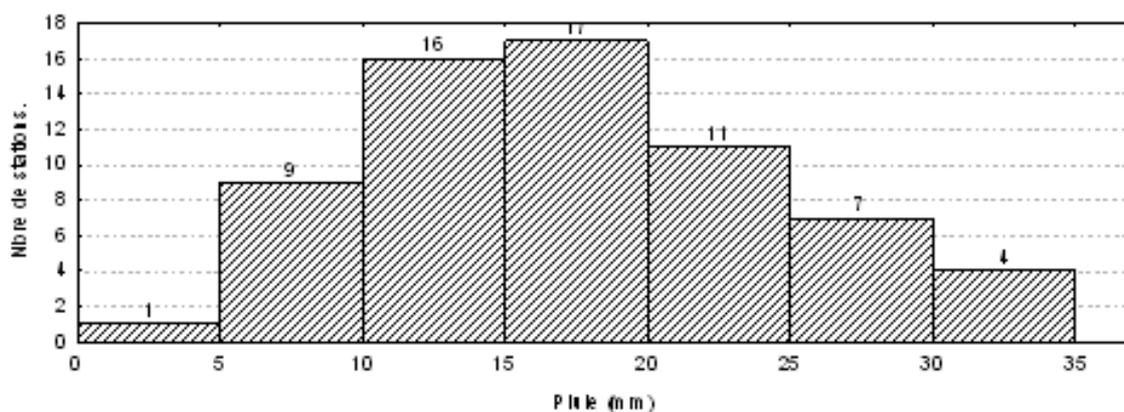


Figure VII.13 : Répartition des stations par classes de pluies (mois de juin)

Les représentations des classes de précipitations annuelle ou mensuelles obtenues montrent les effectifs de stations qui possèdent des moyennes pluviométriques rapprochées. Par ailleurs, il est intéressant d'expliquer le comportement des précipitations selon l'effet combiné de la longitude, la latitude et l'altitude.

## VII. 2 Analyse par régression multiple

Nous avons tenté d'ajuster un modèle explicatif des précipitations (P) par régression multiple. Les variables présent en considération sont la longitude (X), la latitude (Y) et l'altitude (Z).

$$P \text{ (mm)} = a X + b Y + c Z + d$$

Avec : a, b, et c : coefficients relatifs aux variables X, Y et Z ;

d : constante.

Différentes équations de régression multiple sont obtenues, représentant les précipitations à l'échelle mensuelle et à l'échelle annuelle.

La formule polynomiale de précipitation annuelle obtenue s'écrit comme suit :

$$P = 17.923 \text{ Long} + 256,546 \text{ Lat} + 0,0513 \text{ Alt} - 9001,727 + E$$

D'après la formule on observe que la constante joue un effet négatif important sur les précipitations annuelles, le second paramètre qui affecte sur les pluies est la latitude avec un coefficient de 256,54. Aussi, le coefficient de l'altitude affecte moins sur les précipitations annuelles avec un coefficient de 0,0513, et a un degré moins le coefficient de la longitude avec un coefficient de 17,92. Par ailleurs, le coefficient de corrélation (R) caractéristique de la régression multiple des pluies annuelles est largement significatif et égal à 0,701.

## VII.2. 1. Application et interprétation

L'interprétation des équations de régression multiple en fonction des variables longitude, latitude et altitude est faite sous forme graphique, à partir des différentes composantes des formules de régression multiple (coefficients, constante et coefficient de corrélation).

### VII. 2.1.1. Effet de la longitude

Les coefficients du paramètre longitude varient au cours de l'année de façon aléatoire. Cependant, ces coefficients longitudinaux possèdent un signe positif, ce qui n'est pas le cas pour le mois d'avril où le coefficient prend une valeur négative, soit -0,85. Cette valeur représente la valeur la plus faible. Par ailleurs, la valeur la plus élevée est celle du mois de juin avec 4,62. On remarque que la longitude n'influe presque pas sur le paramètre pluviométrique, pendant les mois de septembre et octobre, avec respectivement 0,03 et 0,11. La majorité des valeurs de ces coefficients est positive, cela montre que la longitude affecte positivement les précipitations mensuelles (tableau VII.2).

Tableau VII.2 : Coefficients de la longitude de la régression multiple

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Coef. Long. (°)	3,51	1,25	1,57	-0,85	2,36	4,62	0,99	2,81	0,03	0,11	2,36	0,43

La figure (VII.14.) représente l'influence du facteur topographique longitude, par les valeurs de ces coefficients, sur le comportement des précipitations au cours des mois de l'année. A travers cette figure, nous pouvons dire que l'effet de la longitude sur les précipitations est variable et il se développe d'une façon irrégulière selon les mois de l'année. L'allure du graphique suit une forme zigzag, indiquant que les valeurs coefficients de la longitude de l'équation de régression multiple ne suivent pas une suite logique.

Nous remarquons deux étapes importantes d'évolution de l'effet longitude, la première commence à partir du mois de Janvier où l'effet de la longitude diminue, d'une manière trop marquée pour atteindre une valeur négative -0,85 (avril), la deuxième à partir du mois d'avril

marquée par une augmentation régulière de l'effet de la longitude qui termine en juin en atteignant le maximum avec 4,62.

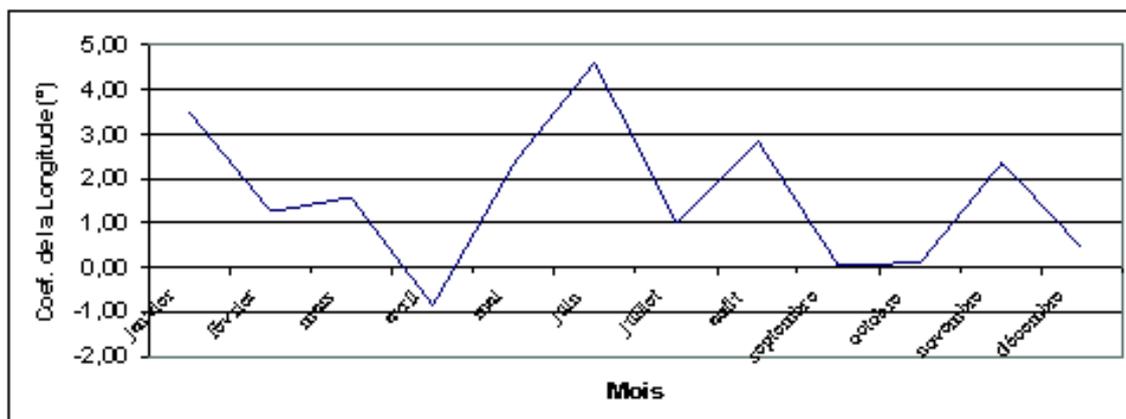


Figure VII. 14 : Comportement des coefficients de la longitude à l'échelle mensuelle

### VII. 2.1.2. Effet de la latitude

Le tableau VII. 3, résume les valeurs des coefficients de la latitude qui sont positives sauf celles de Juillet et Août. Ces valeurs sont positives pour presque tous les mois pluvieux de l'année.

Tableau VII. 3 : Coefficients de la latitude de la régression multiple

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Coef. Lat. (°)	46,42	44,04	19,14	26,53	15,48	2,27	-0,42	-3,32	4,33	6,26	28,00	67,76

A travers la figure VII.15, nous remarquons que l'effet du facteur géographique latitude diminue de janvier jusqu'à juillet et Août où les valeurs deviennent négatives, la courbe par la suite devient ascendante et continue son allure jusqu'au mois de décembre où elle atteint la valeur la plus élevée soit 67,76.

L'effet de la latitude est peu marqué pour les mois de Juin à octobre bien que l'effet de ce facteur est important pour les mois restants, en particulier pour les mois décembre (67,76), janvier (46,42), et février (44,04). Durant le reste des mois de l'année l'effet est moyen. Les résultats obtenus montre qu'il existe une relation proportionnelle de coefficient de la latitude et les précipitations, le mois de décembre est le mois le plus pluvieux de la région d'étude, a coïncidé avec la valeur la plus élevée, et diminue avec la diminution des pluies.

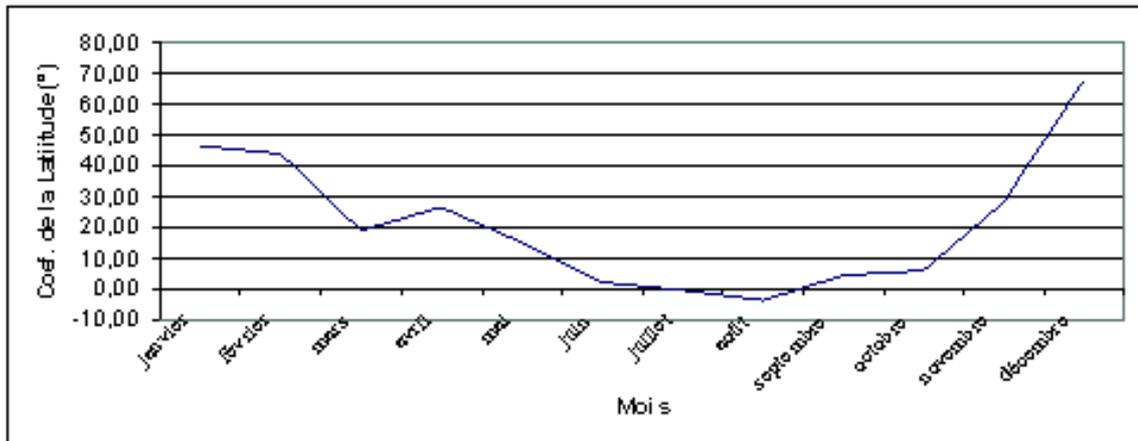


Figure VII.15 : Comportement des coefficients de la latitude à l'échelle mensuelle

### VII. 2.1.3. Effet de l'altitude

Le tableau VII 4, indique les valeurs des coefficients de l'altitude. Celles-ci sont très basses par rapport aux autres coefficients de la longitude et de latitude. Ces coefficients varient entre  $-6,2 \cdot 10^{-3}$  et  $17,9 \cdot 10^{-3}$ .

Tableau VII. 4 : Coefficient de l'altitude de la régression multiple

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Coef. Alt. (m)	0,8 10 <sup>-3</sup>	-6,2 10 <sup>-3</sup>	1,6 10 <sup>-3</sup>	3,5 10 <sup>-3</sup>	17,9 10 <sup>-3</sup>	3,8 10 <sup>-3</sup>	-2,5 10 <sup>-3</sup>	-0,6 10 <sup>-3</sup>	12,6 10 <sup>-3</sup>	5,2 10 <sup>-3</sup>	4 10 <sup>-3</sup>	0

La figure VII.16 montre l'effet de l'altitude sur les précipitations qui est irrégulier. L'effet de l'altitude est relativement important en mois de mai, et il est le plus faible en février. Par ailleurs, il n'a pas d'effet au mois d'hiver et d'été. En général, on constate que l'effet de la l'altitude est très faible voire presque nul, car les valeurs des coefficients sont proches du zéro.

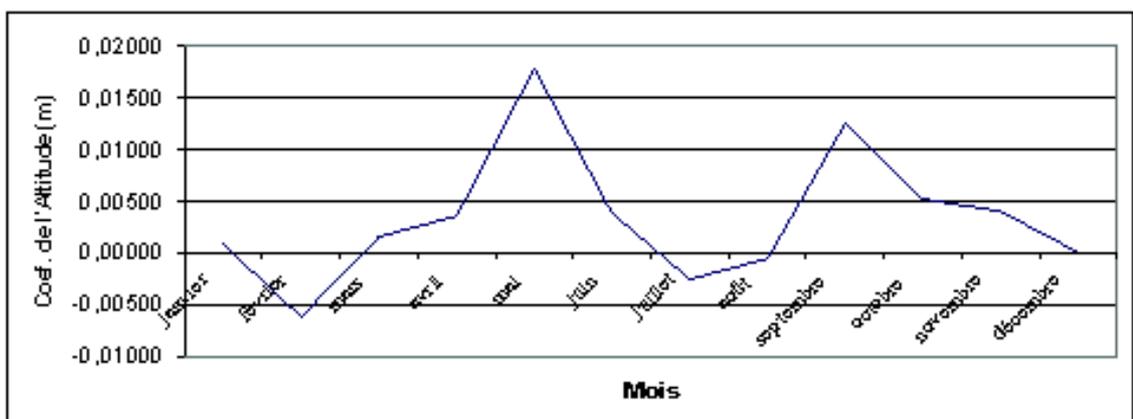


Figure VII.16 : Comportement des coefficients de l'altitude à l'échelle mensuelle

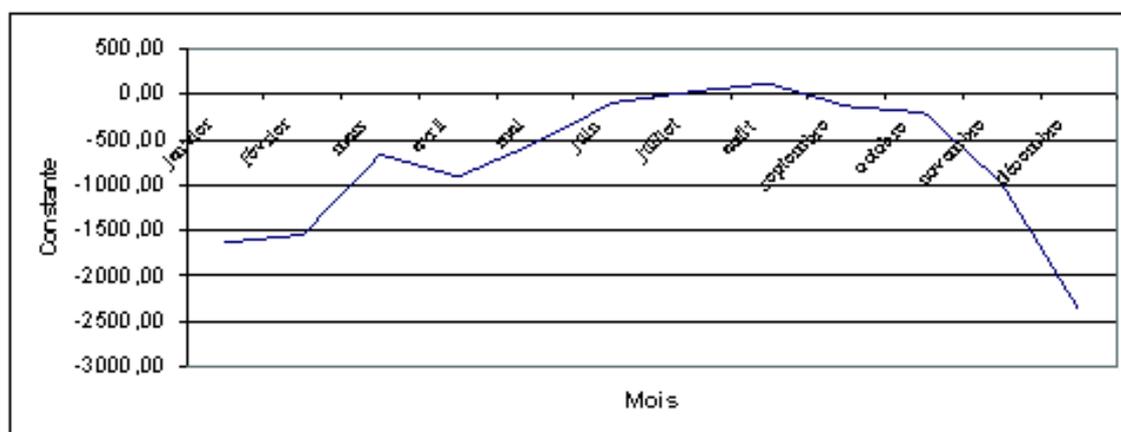
### VII. 2.1.4. Effet de la constante

Le tableau VII.5 englobe les valeurs de la constante. Il est composé d'une série de valeurs dont la plupart sont très faibles et inférieures à zéro. Les seules valeurs positives sont celles du mois de juillet et du mois de août avec les valeurs respectives de 17,92 et 116,09.

**Tableau VII. 5 : valeurs de la constante de la régression multiple**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Constante	1647,27	-1552,30	666,95	-915,64	-547,82	-95,03	17,92	116,09	-131,83	-202,18	-986,60	-2385

L'allure du comportement des précipitations de la période (1986-2006), selon l'effet de l'ensemble des facteurs du milieu restant (pente, exposition, végétation...etc.) englobés dans un seule facteur qui est la constante, est représentée par la figure VII.17. La constante a des effets inversement proportionnels faisant augmenter la quantité des pluies précipitées dans l'espace étudié chaque fois que sa valeur est négative.



*Figure VII.17 : Comportement des constantes à l'échelle mensuelle*

### VII.2.1.5. Coefficient de corrélation

Le tableau VII.6 résume les coefficients obtenus dans chacune des équations pluviométriques, à l'échelle mensuelle.

Le coefficient de corrélation théorique  $R_\alpha$  des différentes formules explicatives du paramètre précipitation est de 0,258, à la probabilité  $\alpha = 5\%$ . Les résultats obtenus des coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,258 (tableau VII.6.), nous pouvons dire que tous les coefficients de corrélation sont significatifs.

**Tableau VII.6 : Résultats de coefficients de corrélations mensuels**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Coef. R	0,681	0,767	0,625	0,706	0,601	0,551	0,272	0,362	0,421	0,326	0,630	0,766

Nous avons réalisé également la courbe du comportement des coefficients de corrélations mensuels. Ce graphe nous permet de voir nettement les mois pour lesquels les équations de la régression multiple sont explicatifs le plus (figure VII.18.). La courbe indique que la majorité des mois ; sauf les mois juillet, août, septembre et octobre, la variation des précipitations est considérablement expliqué par les paramètres topographiques longitude, latitude, altitude et la constante.

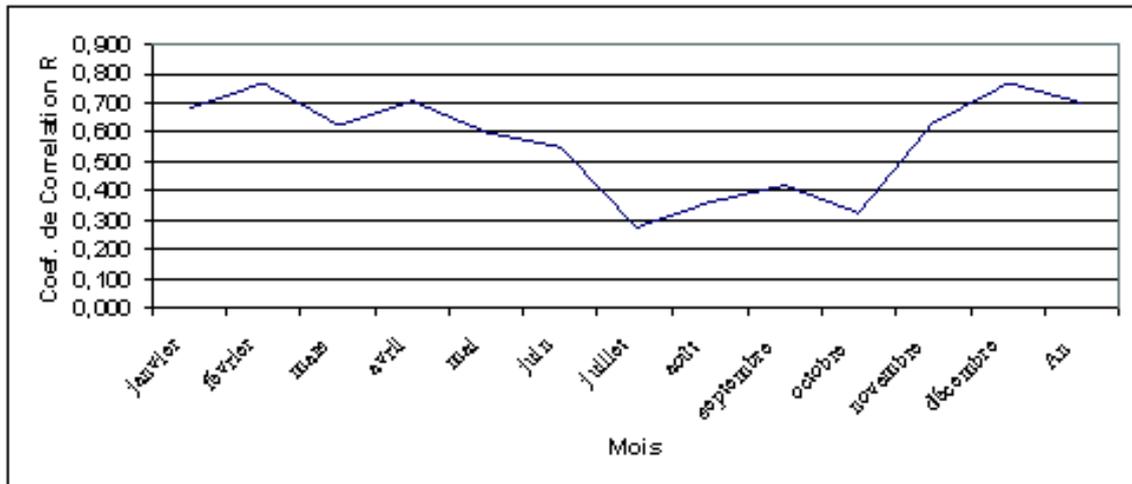


Figure VII.18 : Courbe des coefficients de corrélation de la régression multiple A l'échelle mensuelle

### VII.3. Cartographie numérique des précipitations

Les données des précipitations portant sur la région d'étude nous ont permis d'établir des cartes de répartition spatio-temporelle des précipitations sur la période (1986 – 2006).

La cartographie numérique des précipitations, à l'échelle annuelle et mensuelle, est basée sur l'approche géostatistique. Après avoir déterminé les paramètres de l'équation de régression multiple, il a été nécessaire d'estimer les pluies en des points de l'espace de la région d'étude. Cette opération, a nécessité la conception d'une grille avec un pas de maillage carré (15 Km x 15 Km) qui nous a permis d'obtenir 155 points (figure VI.2). Par ailleurs, l'opération a nécessité aussi de concevoir un MNT avec un maillage de pixels de (700 m x 700 m) et des cartes de résidus par krigeage. Ces cartes nous ont permis d'avoir les altitudes et l'erreur des points du maillage.

#### VII.3.1. Variographie

Nous avons étudié l'analyse structurale des résidus ponctuels des précipitations moyennes et des précipitations moyennes, à l'échelle annuelle et mensuelle. Les variogrammes de surface permettent de déterminer la direction d'anisotropie, la distance entre classes et le nombre de classes. Les paramètres du modèle ou du variogramme théorique sont introduits dans le programme cartographique (Surfer), après avoir validé le variogramme par l'IGF.

##### VII.3.1.1. Variogrammes de surface

Les variogrammes de surface obtenus à l'échelle annuelle retenus qu'on a pris comme exemples, relatifs aux résidus des précipitations et aux précipitations, sont présentés par les figures VII.19 et VII.20 Les autres variogrammes de surface des résidus des précipitations mensuelles et ceux des précipitations mensuelles figurent en annexe 2, accompagnés des différents paramètres des modèles ajustés.

Le variogramme de surface des précipitations moyennes annuelles est indiqué par la figure VII. 20. Nous pouvons constater une direction d'isotropie ou de continuité des précipitations annuelle, Est-Ouest (0°).

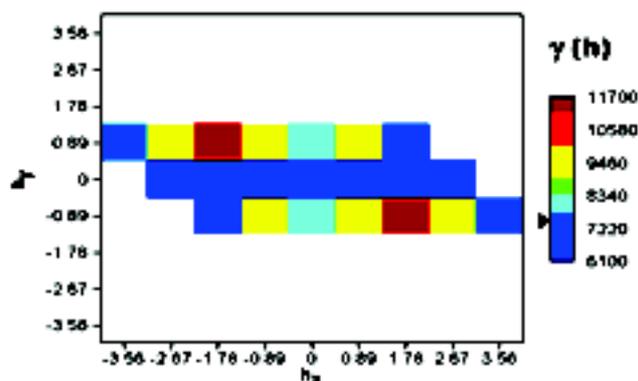


Figure VII. 19 : Variogramme de surface des résidus des précipitations annuelles

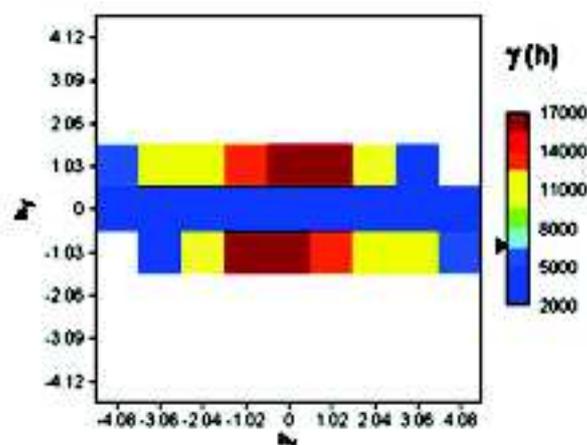


Figure VII. 20 : Variogramme de surface des précipitations annuelles

### VII.3.1.2. Variogrammes directionnels

Les variogrammes directionnels obtenus à l'échelle annuelle montrés comme exemples, relatifs aux résidus des précipitations et aux précipitations selon deux directions, sont présentés par les figures VII.21, VII.22, VII.23 et VII.24. Les autres variogrammes directionnels des résidus des précipitations mensuelles et ceux des précipitations mensuelles figurent en annexe 2, accompagnés des différents paramètres des modèles ajustés.

Le calcul des variogrammes directionnels, basés sur les couples de points orientés suivant une direction donnée, permet de rechercher une éventuelle anisotropie dans la variabilité spatiale des précipitations.

Les figures VII.21, et VII.22 renseignent sur les variogrammes directionnels des résidus de précipitations annuelles 0° et 90°.

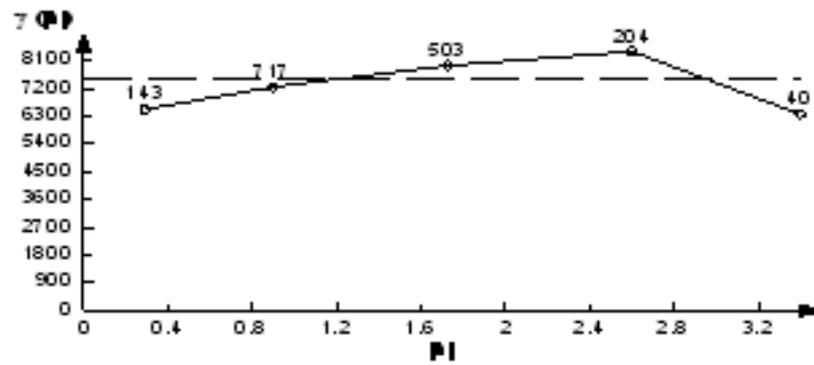


Figure VII. 21 : Variogramme directionnel des résidus des précipitations annuelles selon la direction 0°

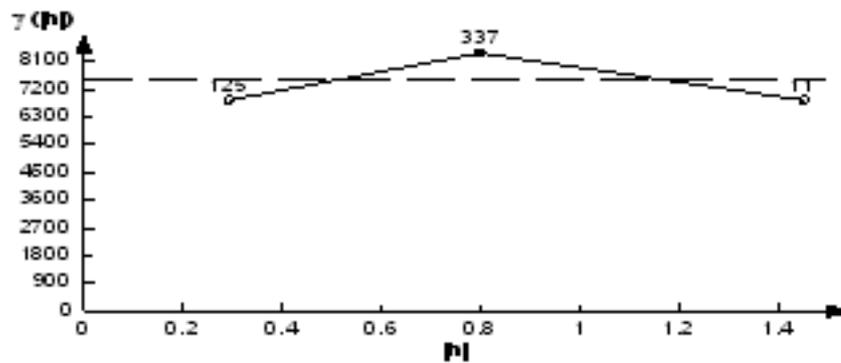
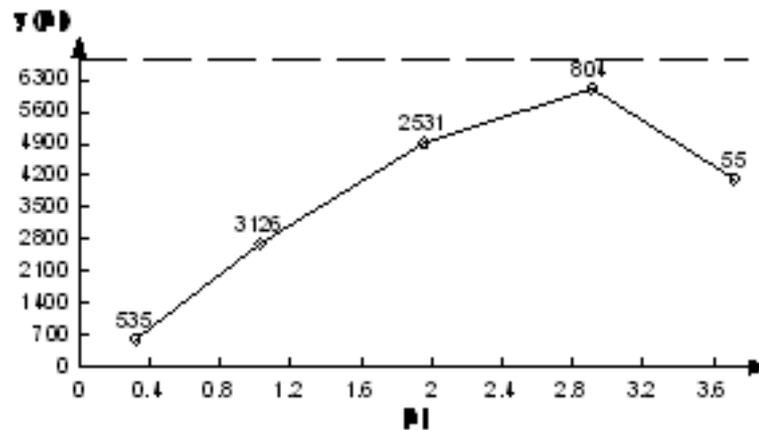
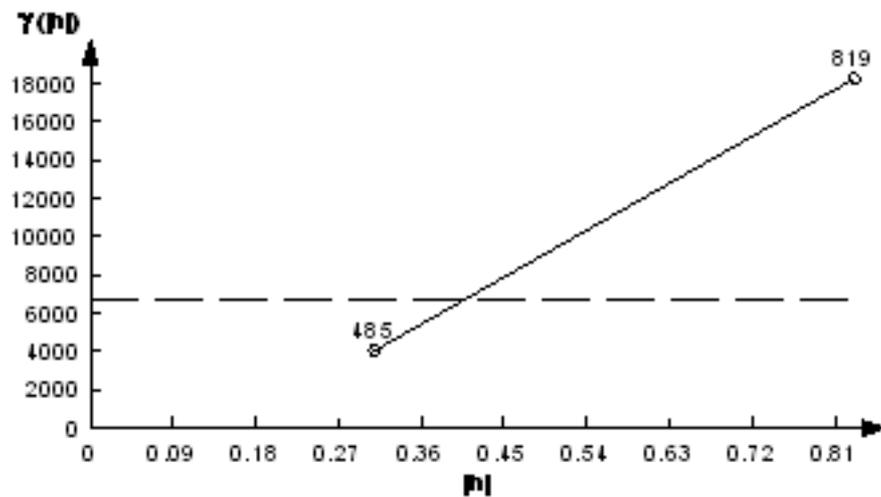


Figure VII. 22 : Variogramme directionnel des résidus des précipitations annuelles selon la direction 90°

Sur l'appui des données de la figure VII.20., nous avons obtenu les variogrammes directionnels suivants (figure VII.23, VII.24).



selon la direction 0°



selon la direction 90°

Les variogrammes directionnels des variables précipitations annuelles, sont ajustés selon un modèle variographique. Le modèle ou le variogramme théorique choisi correspond à celui qui a la plus faible valeur d'I.G.F. Dans le cas des précipitations annuelles le modèle choisi est de type gaussien et la valeur d'IGF est de  $2,17 \times 10^{-3}$

Par ailleurs, on voit clair qu'il existe de faibles effets de pépité sur les variogrammes directionnels des précipitations cela est due probablement au comblement des lacunes par la disponibilité de stations renforcée par les point fictifs donc une réduction du phénomène de la micro régionalisation. La porté du variogramme elle est de 1091,13 mm.

L'ensemble des paramètres des variogrammes directionnels des précipitations annuelles et des résidus de pluies sont illustrés dans le tableau (VII.8)

Tableau VII.8 : Paramètres du variogramme théorique

Variogramme	Variogramme théorique (Modèle)					
	Modèle	I.G.F.	Effet de pépité (mm/an) <sup>2</sup>	Palier/ Puissance	Porte/ pente (m/an)	Rapport d'an
Résidus des pluies annuelles.	Gaussien	$2,17 \times 10^{-3}$	6497,50	1974,50	2,41	2,56
Pluviométrie annuelle	Linéaire	$3,00 \times 10^{-2}$	1156,00	1,85	1091,13	5,26

Les paramètres du modèle des précipitations annuelles nous ont permis de réaliser les cartes des précipitations moyennes annuelles par la méthode d'interpolation par krigeage.

Les paramètres des variogrammes théoriques des résidus de précipitations mensuelles et des précipitations mensuelles sont présentés au niveau de l'annexe 2.

### VII.3.2. Cartes des résidus

Les cartes des résidus de précipitations annuelles et mensuelles nous ont permis d'avoir la valeur du résidu (erreur) géo référencée. Cette dernière est remplacée dans l'équation de régression multiple afin de déterminer les valeurs précipitations à des points de l'espace de la région d'étude selon le maillage confectionné.

Le krigeage des résidus de précipitations annuelles nous a permis d'avoir la carte d'isovaleurs de résidus représentée par la figure VII.25.

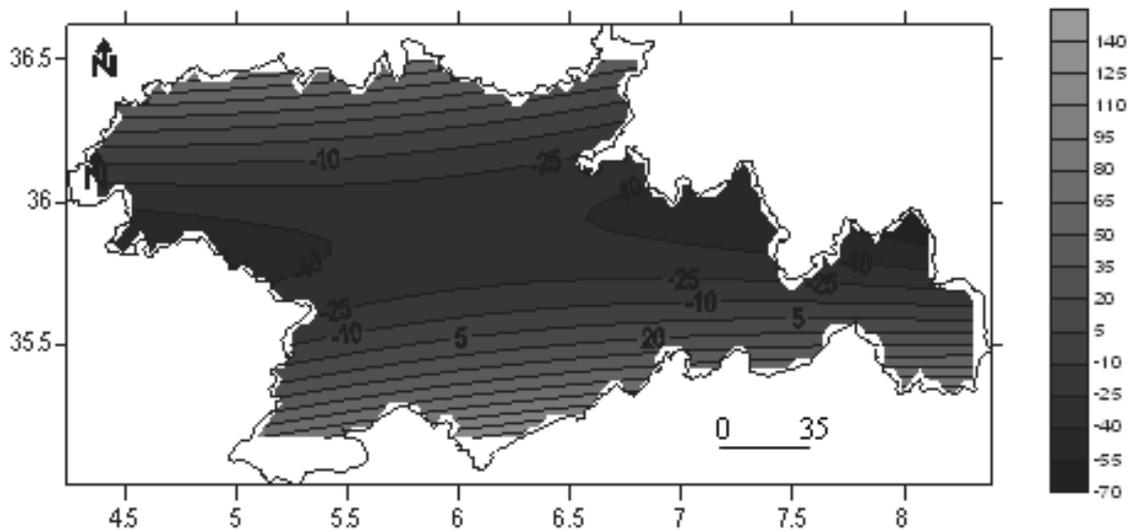


Figure VII.25 : Carte des résidus de précipitations annuelles

Les résidus de précipitations annuelles sont compris entre -70 et 140, la partie centrale de la région d'étude possède des valeurs de résidus négatives, beaucoup plus les extrémités latérales de la partie centrale de la région d'étude où les valeurs des isolignes possèdent des valeurs négatives importantes atteignant les -55 et -70. Par ailleurs, les valeurs des isolignes les plus élevées (supérieurs à 50) sont comprises entre les latitudes 35° et 35,35° au sud de la région d'étude, et entre les latitudes 36,3° et 36,6° au nord de la région d'étude.

Les valeurs des isolignes des résidus de précipitations nulles ou proches de zéro sont entre les longitudes 35,4 et 35,5 et entre les longitudes 36,2 et 36,3.

On remarque par ailleurs que les courbes isovaleurs des résidus suivent un comportement de variation selon la latitude.

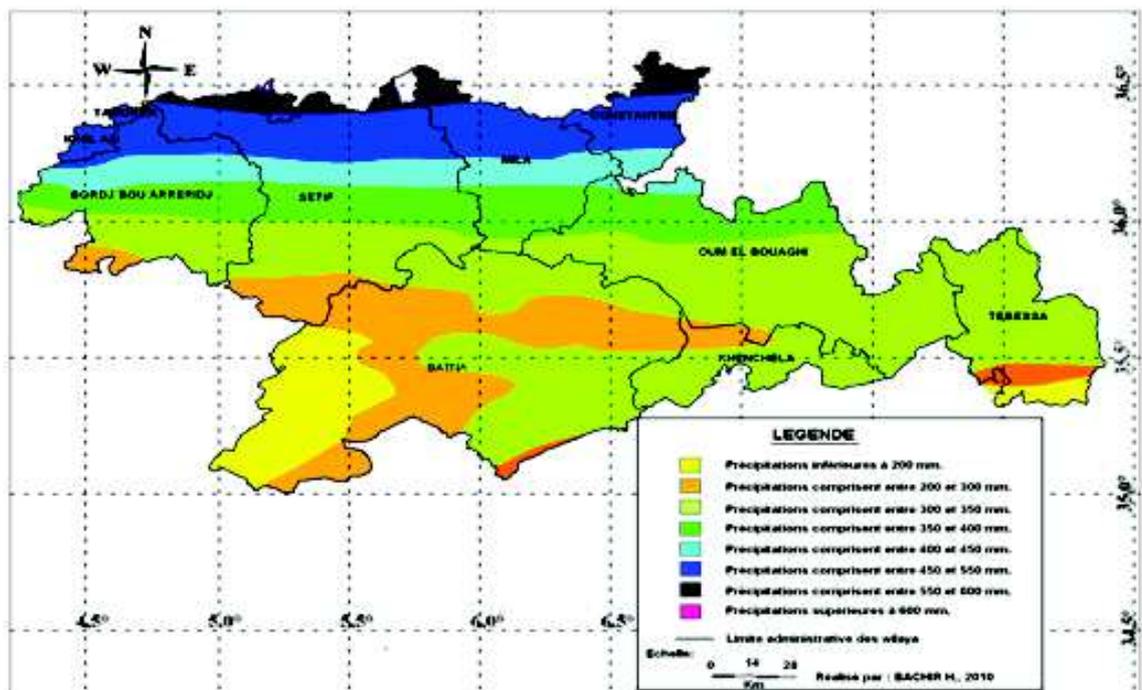
Les cartes des résidus de précipitations mensuelles sont présentées au niveau de l'annexe 3.

## VII.4. Interprétation des cartes des précipitations et impacts

Une fois fini avec la régression multiple et le travail de variographie, les données des précipitations ainsi que les paramètres des variogrammes des précipitations annuelles et mensuelles sont introduites dans le logiciel de cartographie pour subir une interpolation par krigeage. Cette dernière étape, nous a permis de réaliser les différentes cartes de répartition spatio-temporelle des précipitations à l'échelle annuelle et à l'échelle mensuelle.

### VII.4.1 Précipitations annuelles

Il est important de bien comprendre plus sur le comportement des précipitations annuelles d'une région donnée, pour faire une analyse agronomique. La figure VII.26 montre répartition spatiotemporelle des champs de précipitations annuelle de la période allant de 1986 jusqu'à 2006.



D'après la figure VII.26 on peut dire que l'effet de la latitude a bien marqué le comportement des précipitations.

On s'aperçoit clairement d'après la figure que les isohyètes comprises entre 300 mm et 350 mm domine la région d'étude, elle occupe une superficie de 14444 Km<sup>2</sup>. La seconde isohyète importante est celle comprise entre 200 mm et 300 mm avec une superficie de 5298 Km<sup>2</sup>, elle occupe une partie importante de la wilaya de Batna, elle traverse le sud des wilayas de Sétif, de Bordj Bou arreridj et de Tébessa. Par ailleurs, les isohyètes comprises entre 350 mm à 400 mm occupe une superficie de 4304 Km<sup>2</sup>. Aussi, les isohyètes dont les précipitations sont supérieures à 400 mm occupent la partie nord de la région d'étude avec une superficie totale de 758 200 ha dont une superficie de 404 900 ha représentée par les isohyètes comprises entre 450 mm et 550 mm.

La question qui se pose : Est ce que la région d'étude a connue des modifications concernant le cumul pluviométrique annuel durant les dernières 50 années ? Pour essayer de répondre à cette question, nous avons réalisé la carte de comparaison des isohyètes de précipitations annuelles confectionnées par Chaumont et Paquin traitant la période 1913 à 1938 par rapport à celle que nous avons réalisé dans le cadre de cette étude (Figure VII.27).

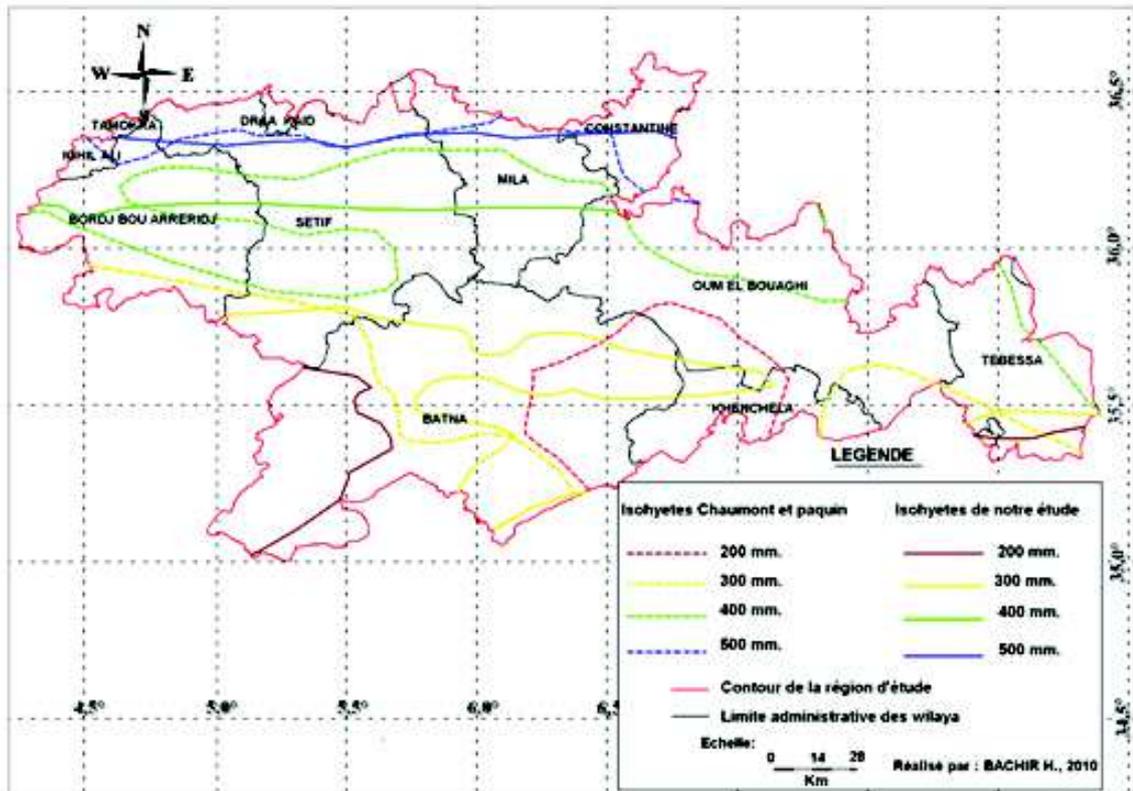


Figure VII.27 : Comparaison des isohyètes réalisées dans l'étude par rapport à celle réalisées par Chaumont et Paquin

On remarque qu'il n'existe pas de grand changement de l'isohyète 500 mm dans le temps. Le changement est clair au niveau de l'isohyète 400 mm qui auparavant touchait une aire plus importante car elle touchait jusqu'au sud de Sétif, le sud de Bordj Bou Arreridj et le nord de Oum El Bouaghi ainsi que la partie Est de Tébessa.

D'après la carte, on remarque aussi que l'isohyète 300 mm a la même allure qu'auparavant, néanmoins, elle a pris plus d'espace, maintenant elle touche les wilayas de Batna et Khenchela. Par ailleurs, il y'a apparition d'une nouvelle isohyète (200 mm) à l'ouest de la wilaya de Batna et au sud de la wilaya de Tébessa. Cette situation montre que le sud de la région d'étude est devenu dans le temps plus aride.

La figure VII.28, fait ressortir la différence de répartition des précipitations annuelles entre la carte réalisée dans le cadre de la présente étude et celle réalisée par l'INSID (2007).

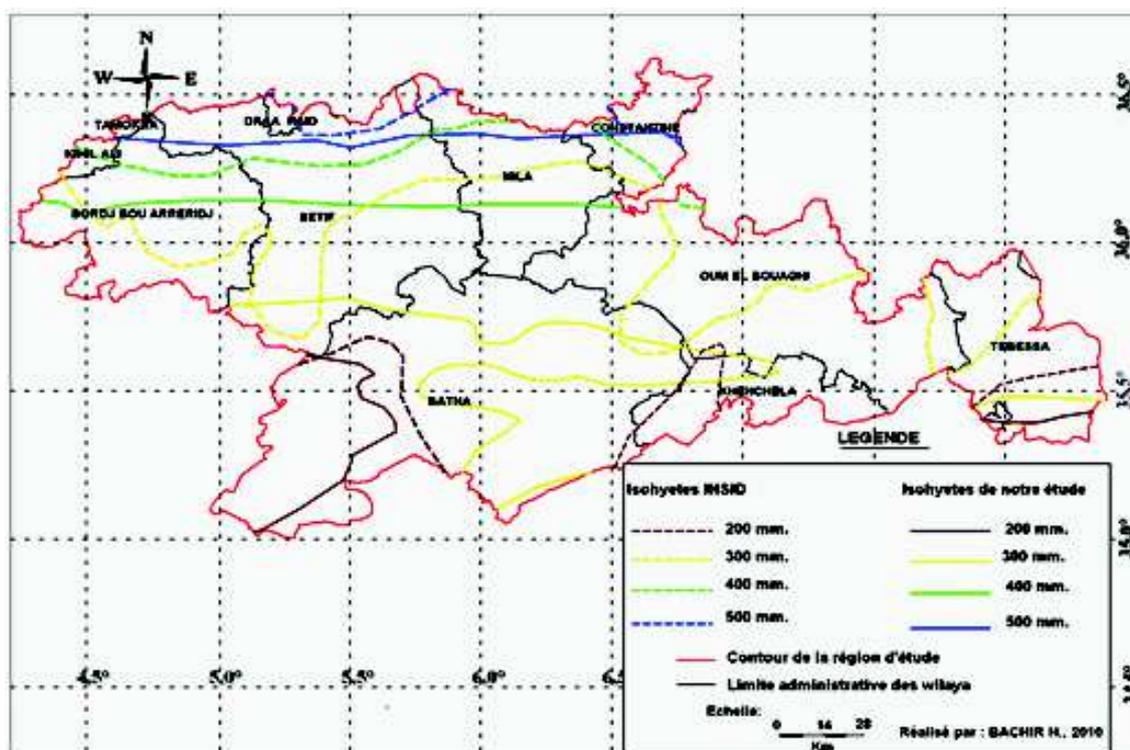


Figure VII.28 : Comparaison des isohyètes réalisées dans l'étude par rapport à celle réalisées par l'INSID (2007)

Nous avons voulu présenter cette carte de part l'importance de montrer la différence de répartition des précipitations entre les deux cartes due essentiellement à la méthode de cartographie numérique utilisée. La carte de l'INSID était réalisée par krigeage simple en tenant compte que de l'influence de la longitude et de la latitude. On voit une différence dans la répartition des isohyètes entre les deux cartes. Cette différence est due probablement au supplément d'information apporté par l'influence des autres paramètres à savoir l'effet de l'altitude.

Sur le plan agronomique et comme nous l'avons évoqué dans la partie bibliographique, la production des blés durs est conditionnée par les quantités de pluie précipitées durant la campagne. Le blé dur a besoin d'une quantité de pluie supérieure ou égale à 400 mm durant son cycle de développement.

La carte de répartition des précipitations annuelles de la période 1986-2006 de la région d'étude montre que les plages où les besoins en eau du blé dur sont satisfaits se situent au nord de la région d'étude, où il existe une bande (400 mm et plus) de 758 200 ha. Cette bande constitue l'endroit idéal pour la production des blés durs en pluviale avec le respect de l'itinéraire technique de cette céréale.

Aussi, la bande (350 mm – 400 mm), constitue elle aussi un endroit favorable à la mise en place des blés durs, avec des apports d'irrigations de compléments modérés. En effet, durant une année pluvieuse les apports d'irrigations peuvent être minimes ou nuls, et durant les années sèches les apports peuvent atteindre les 100 mm d'eau d'irrigation.

Par ailleurs, sur la bande (300 mm – 350 mm), la production du blé dur sans irrigation de complément n'a aucun sens. Sur ces plages, les quantités d'eaux d'irrigations peuvent

être très importantes et atteignent durant les années sèches 180 mm, dans ces plages il faut revenir à la notion de rentabilité de la culture du blé dur en irriguée.

Selon Baldy (1992), les endroits où la pluviométrie est inférieure à 300 mm il est conseillé de mettre en place des cultures céréalières adaptées qui seront tolérantes au stress hydrique comme les orges. Donc le blé dur n'a pas sa place dans ces régions.

#### VII.4.2 Précipitations mensuelles

Nous avons réalisé des cartes de répartitions de précipitations à l'échelle mensuelle sur dix mois en commençant par le mois de septembre (début de campagne) et terminant par juin (fin de campagne).

Nous avons essayé de représenter la répartition spatiale des précipitations dans la région d'étude de chaque mois, ainsi, d'essayer de localiser les mois et les plages de la région d'étude où le stress hydrique peut survenir. Aussi, nous tenter d'essayer de donner une interprétation agronomique par rapport au cumul pluviométrique et sa répartition spatiale. Pour cela, nous interprétons les cartes de précipitation par saison en commençant par la saison automnale. Aussi nous focalisons beaucoup plus nos interprétations sur la partie apte à la mise en place du blé dur.

Les figures VII.29, VII.30 et VII.31 représentent la répartition des précipitations dans la région d'étude, respectivement pour les mois d'automne : septembre, octobre et novembre.

On peut dire qu'en général la saison automnale est caractérisée par de faibles précipitations.

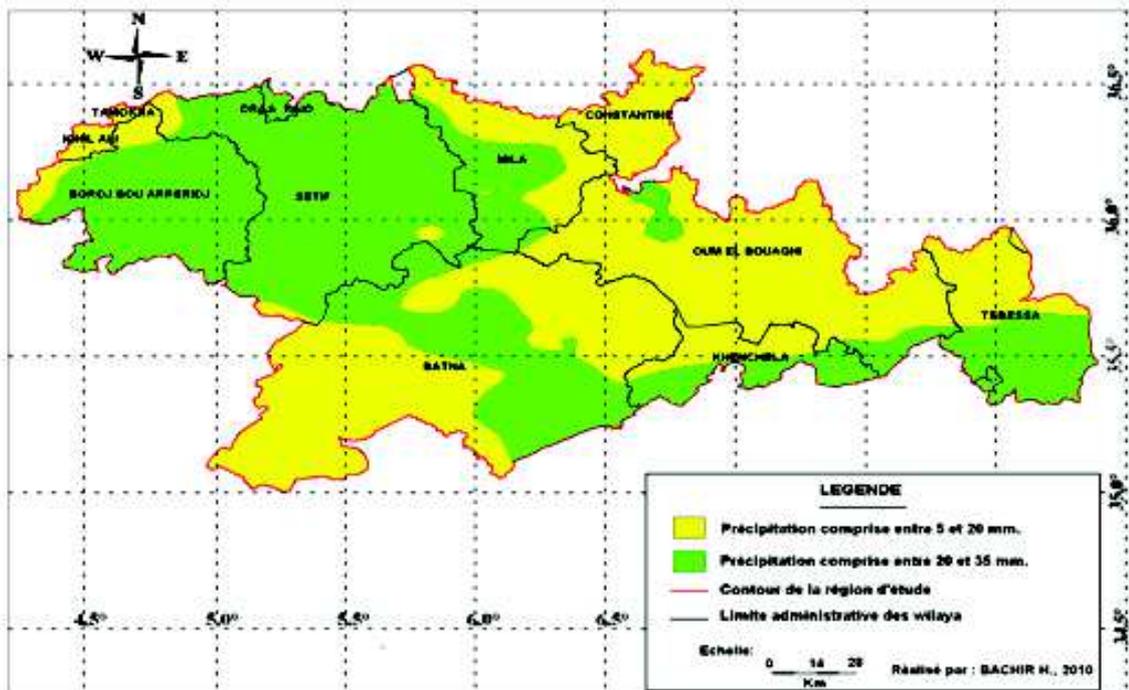
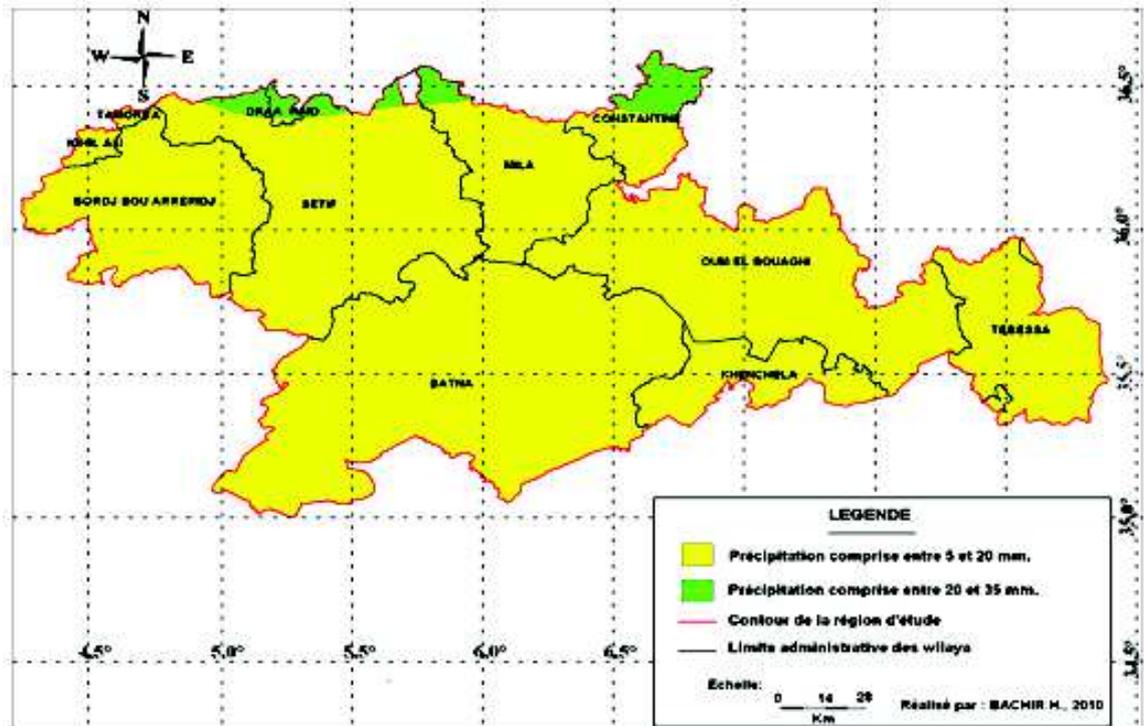


Figure VII.29 : Répartition des précipitations du mois de septembre de la région d'étude de la période 1986-2006

D'après la figure VII.29, les wilayas de Sétif, Bordj Bou Arreridj et la partie ouest de Mila, bénéficient d'une pluviométrie comprise entre 20 mm et 35 mm ; ces pluies sont souvent sous formes d'averses qui permettent une ré humectation de la couche superficielle après

les mois chauds et secs de l'été. Cette situation permet le lancement des travaux du sol dans ces parties de la région d'étude. Par ailleurs, dans les régions où les pluies sont inférieures à 20 mm, les céréaliculteurs attendent le mois d'octobre pour commencer leurs travaux du sol, sauf pour les années humides et pluvieuses.

La figure VII.30, montre que des petites parties situées au nord des wilayas de Sétif, de Mila et de Constantine reçoivent des quantités de pluies comprises entre 20 mm et 35 mm. Le reste de la région d'étude reçoit une quantité de pluie moyenne inférieure à 20 mm. On peut dire aussi que le mois d'octobre est considéré comme un mois sec.



*Figure VII.30 : Répartition des précipitations du mois d'octobre de la région d'étude de la période 1986-2006*

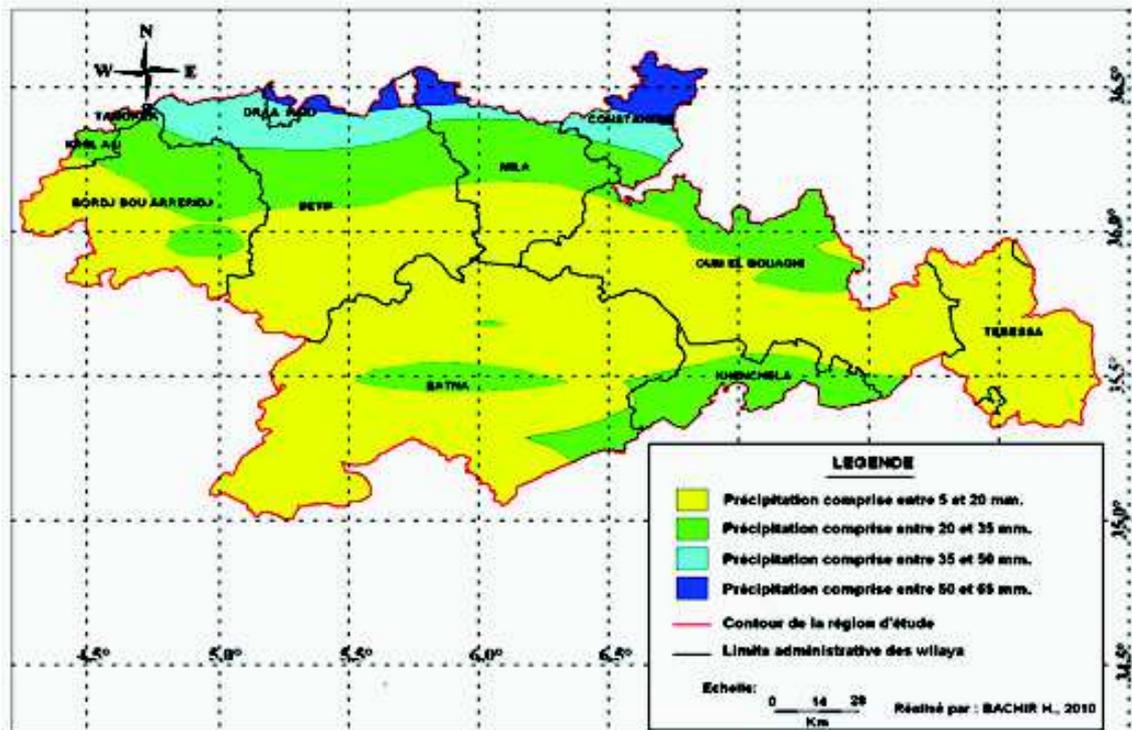


Figure VII.31 : Répartition des précipitations du mois de novembre de la région d'étude de la période 1986-2006

La figure VII.31, montre qu'une bonne partie de la région nord reçoit des précipitations significatives comprises entre 35 mm et 65 mm, ces quantités de pluie permettent d'irriguer les surfaces emblavées, pour les semis précoces. Les quantités de pluies de la bande 20 mm à 35 mm permettent de poursuivre les travaux cultureux et la fertilisation de fond dans de bonnes conditions.

Les figures VII.32, VII.33 et VII.34 représentent la répartition des précipitations dans la région d'étude, respectivement pour les mois d'hiver : décembre, janvier et février.

On peut dire qu'en général la saison hivernale est caractérisée par des précipitations importantes dans la partie dite apte à la production du blé dur.

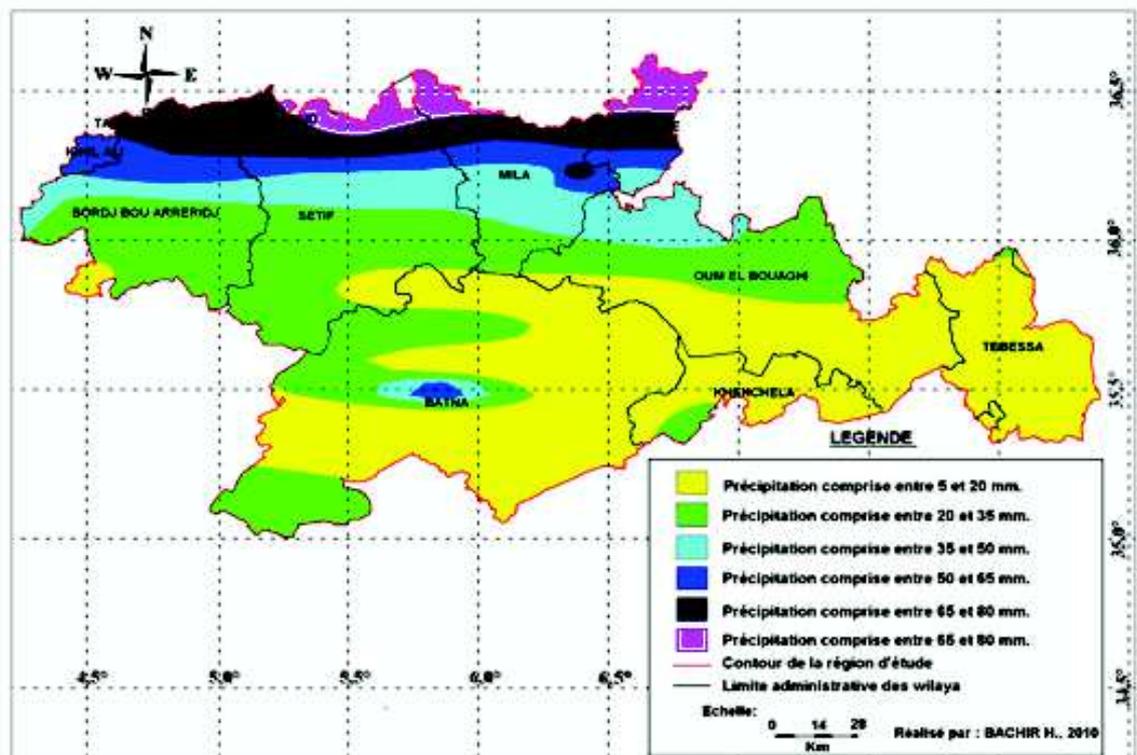


Figure VII.32 : Répartition des précipitations du mois de décembre de la région d'étude de la période 1986-2006

D'après la figure VII.32, on remarque que la partie nord est irriguée par des quantités de précipitations importantes, ces quantités permettent une bonne et homogène levée du blé dur emblavé sur cette partie de la région d'étude, ainsi que de recharger la réserve en eau du sol.

Durant le mois de janvier (figure VII.33) la bande large au nord de la région d'étude rétrécit laissant la place à une autre bande moins pluvieuse 20 mm 35 mm.

Durant le reste des mois de l'hiver la partie nord de la région d'étude est pourvue en précipitations pour assurer un bon développement des cultures.

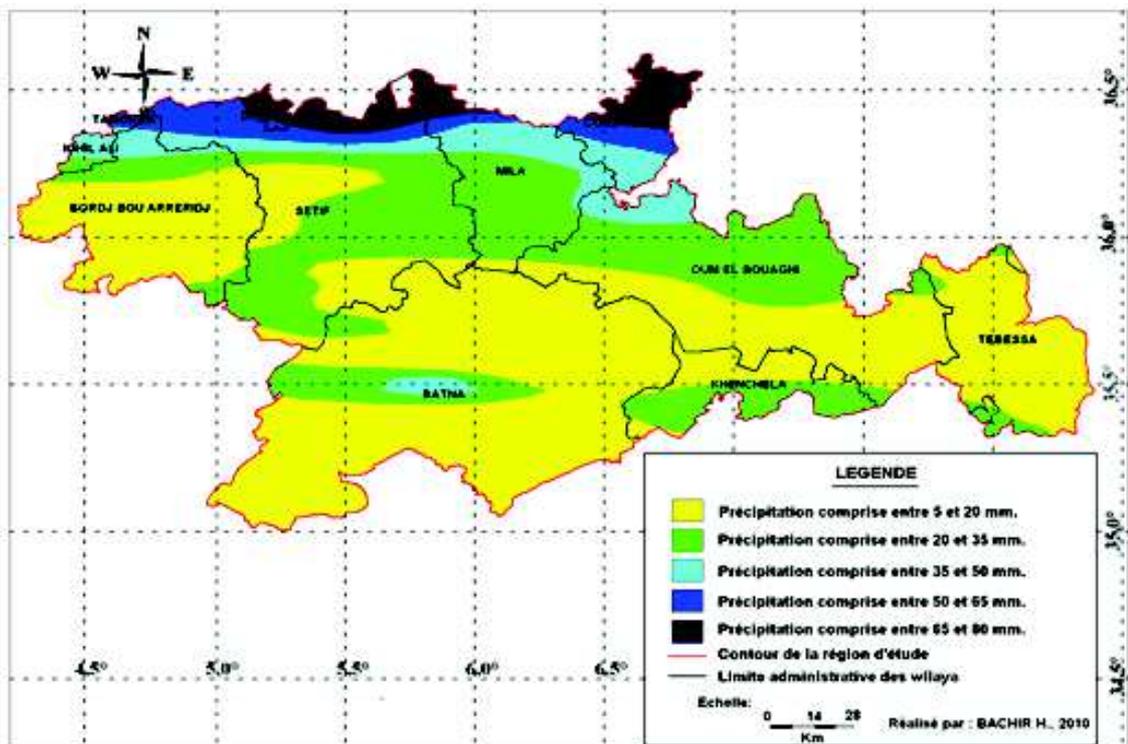


Figure VII.33 : Répartition des précipitations du mois de janvier de la région d'étude de la période 1986-2006

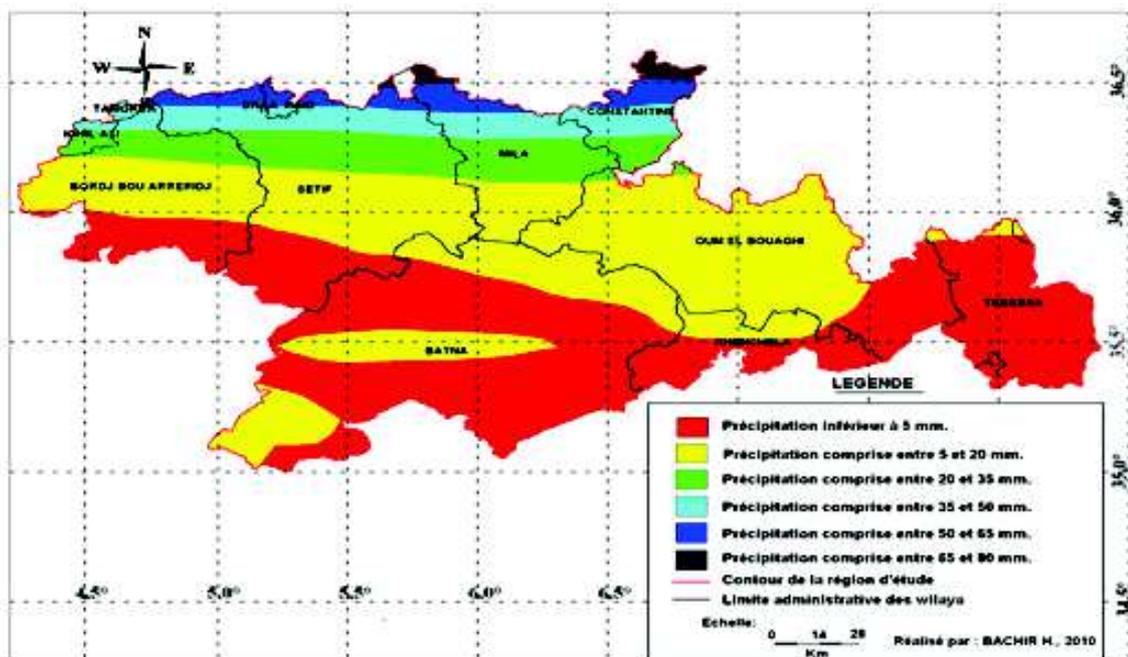


Figure VII.34 : Répartition des précipitations du mois de février de la région d'étude de la période 1986-2006

La figure VII.34, montre que le mois de février est caractérisé par une sécheresse au sud de la région d'étude. A cette période de l'année les températures commencent à

augmenter et le blé dur commence à prendre du volume, c'est la période des besoins en eau pour le développement du végétal.

Les figures VII.35, VII.36 et VII.37 représentent la répartition des précipitations dans la région d'étude, respectivement pour les mois de printemps : mars, avril et mai. Cette saison est considérée comme la saison des grands besoins en eau des blés durs.

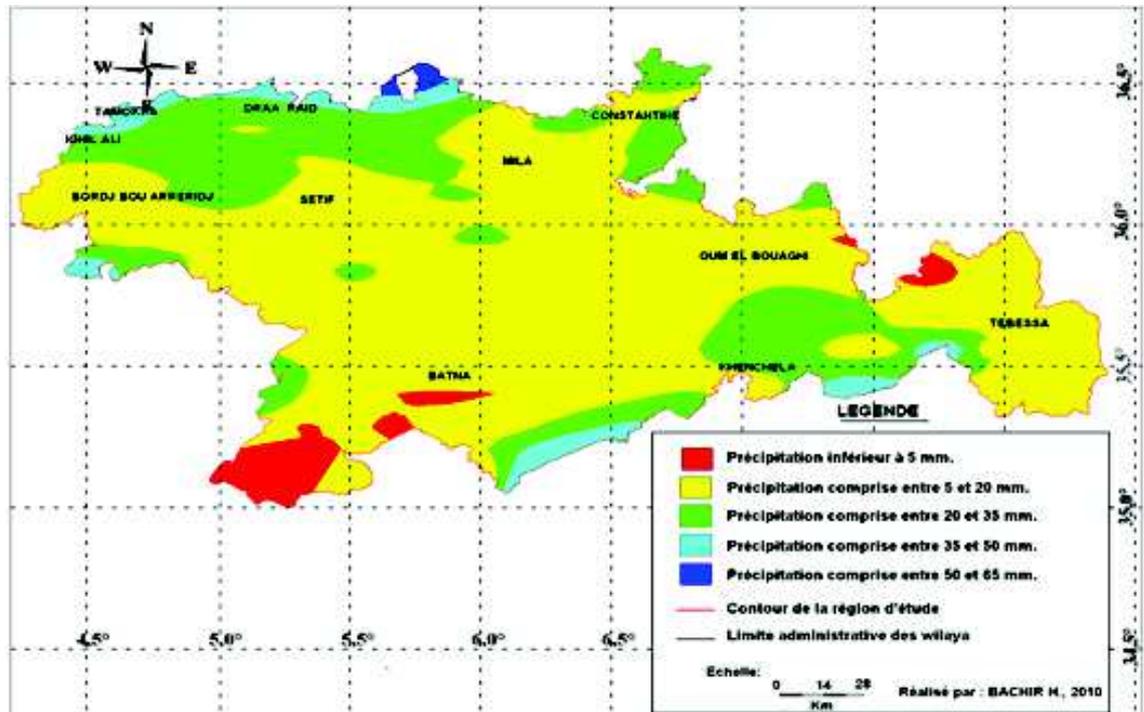


Figure VII.35 : Répartition des précipitations du mois de mars de la région d'étude de la période 1986-2006

La figure VII.35, montre qu'il existe deux isohyètes dominantes en ce mois de la campagne, à savoir 5 mm à 20 mm et les isohyètes 20 mm à 35 mm. Au nord de la région d'étude, à l'exception d'une bande d'une pluviométrie supérieure à 35 mm située à l'extrême nord, l'isohyète dominante est celle possédant une pluviométrie comprise entre 20 mm et 35 mm.

Le stade phénologique des cultures mises en place durant octobre et novembre coïncide avec le stade fin tallage à début montaison. A ce stade le nombre de grain par épis ce développe, un stress hydrique survenu à cette période peut affecter le nombre des grains par épis et donc la production. La situation pluviométrique au nord de la région d'étude laisse dire que les cultures de blé dur auront leurs doses de pluies.

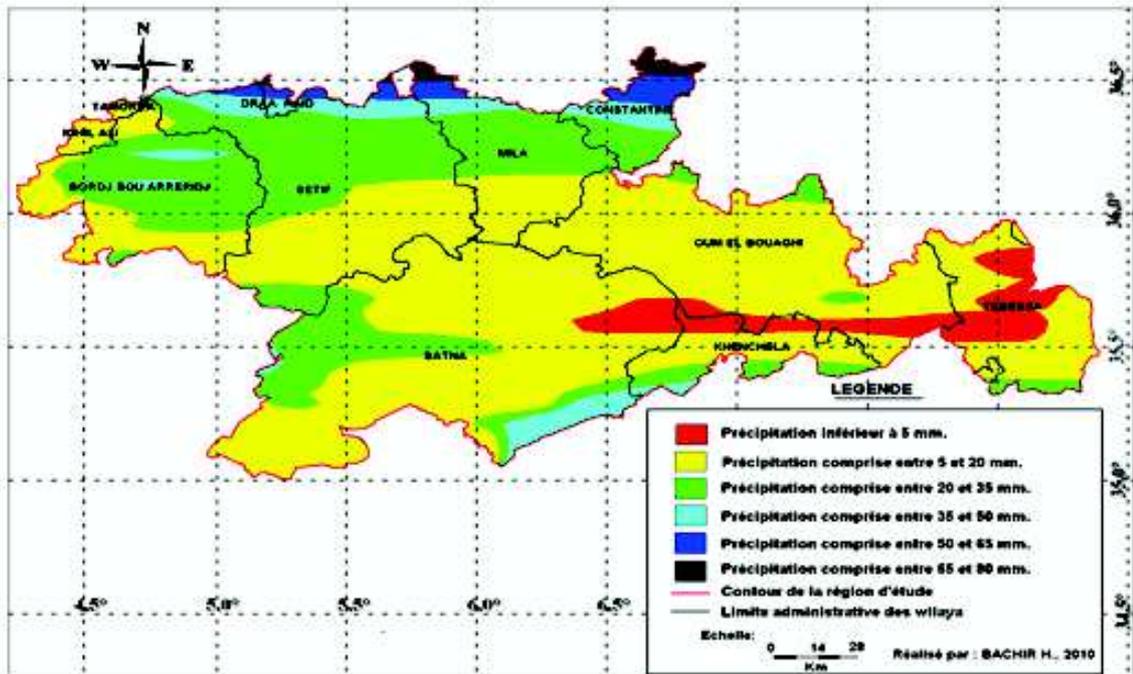


Figure VII.36 : Répartition des précipitations du mois d'avril de la région d'étude de la période 1986-2006

La figure VII.36, montre qu'au nord de région d'étude les isohyètes supérieures à 35 mm touchent une bande un peu plus large qu'au mois de mars. En effet, ces isohyète touchent aussi une bonne partie de la wilaya de Constantine.

Le stade phénologique des cultures mises en place durant octobre et novembre coïncide avec la fin du stade montaison à début épiaison, ce dernier stade phénologique précède la floraison d'où un stress à ce stade provoquant l'avortement, et affecte la production. La situation pluviométrique au nord de la région d'étude laisse dire que les cultures de blé dur auront leurs doses de pluies. Néanmoins durant les années sèches une irrigation d'appoint est recommandée à la montaison, Car la réhumectation du sol à cette époque permet une meilleure fécondation.

La figure VII.37, montre qu'en mois de mai, les isohyètes 20 mm à 35 mm couvrent l'intégralité de la partie nord de la région d'étude. Par ailleurs, une partie du sud de la wilaya de Bordj Bou Arridj bénéficie d'une pluviométrie mensuelle supérieure 35 mm.

Le stade phénologique des cultures mises en place durant octobre et novembre coïncide avec la fin du stade épiaison et floraison à remplissage du grain. A cette période les besoins en eau du blé sont à leurs extrêmes comptes tenus la demande climatique qui deviens importante et la demande en eau pour les besoins de remplissage des grains de blé. A cet effet les besoins en eau des cultures mise en place, doivent être satisfaites par l'eau de pluie et/ou par irrigation.

La situation pluviométrique au nord de la région d'étude laisse dire que les cultures de blé dur auront des quantités de pluies non suffisantes pour assurer des rendements importants sauf durant les années où la pluviométrie mensuelle dépasse les 45 mm. Il est recommandé d'apporter une irrigation d'appoint durant ce mois pour améliorer la productivité des blés et obtenir des rendements acceptables.

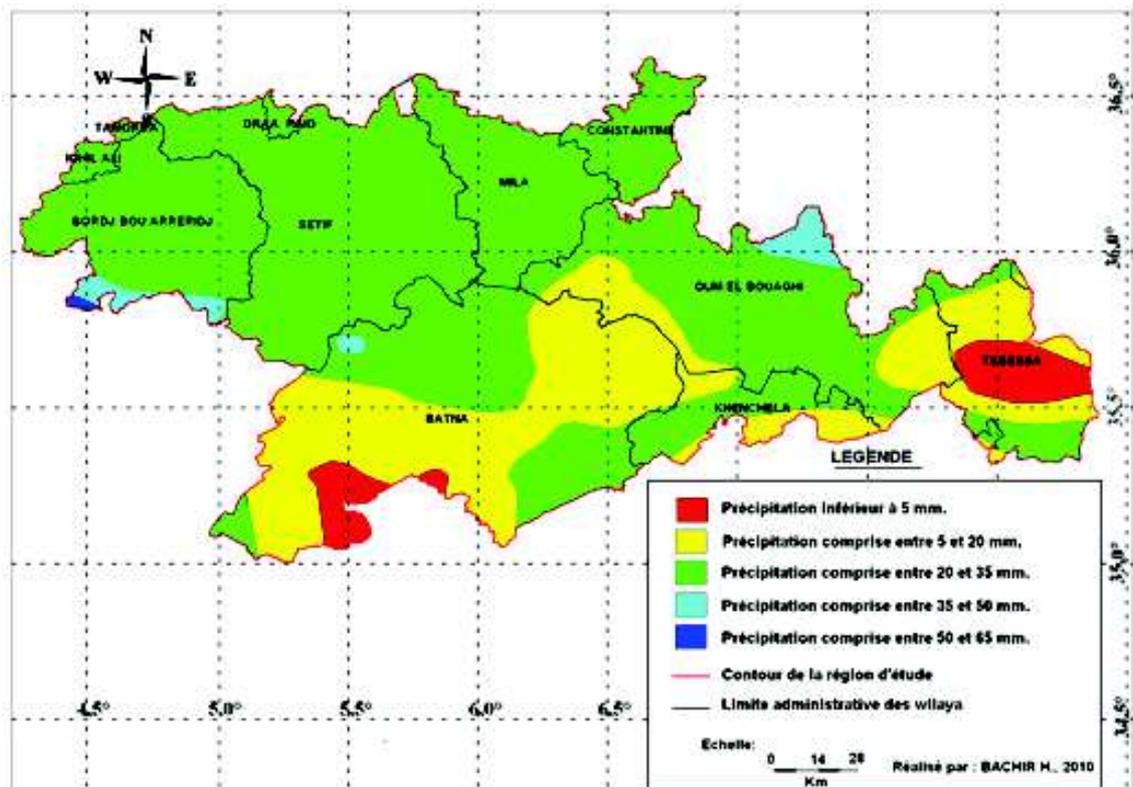


Figure VII.37 : Répartition des précipitations du mois de mai de la région d'étude de la période 1986-2006

La figure VII.38, montre qu'en mois de juin, la région d'étude reçoit des quantités de pluies inférieures à 20 mm. Le stade phénologique des cultures mises en place durant octobre et novembre coïncide avec le stade phénologique remplissage du grain « laiteux pâteux ». A cette période le grain commence à durcir et les besoins en eau du blé ne sont pas importants.

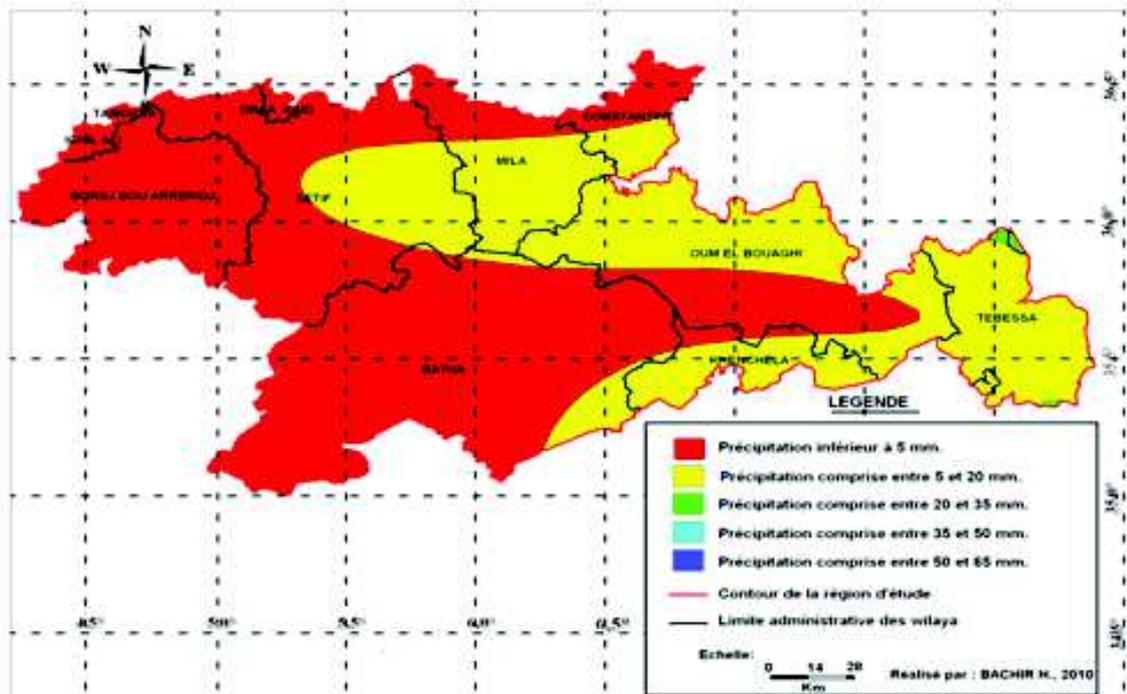


Figure VII.38 : Répartition des précipitations du mois de juin de la région d'étude de la période 1986-2006

Tenant compte des précipitations annuelles et de la nature des sols existant dans la région d'étude ainsi que sur la couverture forestière, nous avons fait réaliser une carte présentant les plages potentielles existantes dans la région d'étude (figure VII.39). Pour réaliser cette carte, nous avons superposé trois cartes thématiques à savoir : 1) la carte des précipitations annuelle de la région d'étude ; 2) la carte de répartition de la couverture forestière de la région d'étude ; 3) la carte des sols de la région d'étude réalisé par Durand (1974).

La répartition partielle du bâti sur les cartes dont nous disposons ne nous a pas permis de prendre en considération la superficie occupée par les agglomérations en vue de la soustraire de la zone d'étude.

La figure VII.39, montre la répartition des zones dites potentielles pour la production de blé dur, ainsi la partie intermédiaire pour la production de blé dur nécessite des apports d'eaux supplémentaires. La superficie initiale qu'occupe la partie potentielle en prenant seulement le facteur précipitation est de 758200 ha, après avoir soustrait les plages non potentielles pour la mise en place des blés durs par rapport aux conditions sols et l'occupation forestière, la superficie a diminué pour atteindre 651500 ha soit une diminution de 1067 ha. En ce qui concerne la partie intermédiaire la superficie atteint 378900 ha après avoir occupée initialement une superficie de 430400 ha.

La zone située au sud de la zone intermédiaire est non potentielle à la production de blé dur en pluviale et elle est favorable pour mettre en place des cultures plus tolérantes à la sécheresse comme les orges à titre d'exemple.



---

# CONCLUSION GENERALE

La cartographie des champs pluviométriques, s'appuyant sur la géostatistique permet d'optimiser l'estimation de la pluviométrie en tout point d'une zone considérée, et de fournir une interpolation nettement meilleure que celle effectuée à partir des méthodes d'interpolation usuelles, il est nécessaire de prendre en considération les paramètres topographiques (longitude, latitude et altitude).

La méthode d'analyse et d'estimation de la variable « précipitation », faisant appel à un certain nombre d'outils statistiques (régression multiple, géostatistique), nous offre l'opportunité de réaliser la manipulation retenue. D'un point de vue général, elle nous a permis d'acquérir en des points non renseignés des valeurs de précipitations ressorties par estimation, à l'échelle spatio-temporelle.

A l'échelle mensuelle et annuelle, l'approche statistique basée sur les équations de régression multiple a montré que les facteurs topographiques(longitude, latitude et altitude) affectent le comportement des précipitations, avec des valeurs plus importantes pour la latitude. Cette relation est plus importante pour les mois pluvieux (décembre, janvier, février).

L'analyse comparative de la carte des précipitations annuelles réalisée dans cette étude par rapport à d'autres travaux, a montrée une certaine conformité dans le tracé de ces isohyètes comparativement à la carte de Chaumont et Paquin sauf pour l'isohyète 400 mm qui n'est pas conforme. Par ailleurs, l'utilisation de la régression multiple a montrée l'intérêt de la prise en considération d'autres paramètres (l'altitude et la constante) dans la conception de ces cartes, ce qui constitue un avantage par rapport à la cartographie des précipitations à l'échelle de l'Algérie réalisée par l'INSID. Nous pouvons dire aussi, que cette méthode peut être utilisée pour des données autres que pluviométriques.

La cartographie par approche statistique combinée aux S.I.G, offrent maintenant une possibilité pour leurs utilisations dans des domaines larges y compris le domaine climatique, et que nous qualifierons d'outils d'aide à la décision.

Du point de vue agronomique, nous pouvons déduire que la céréaliculture pluviale, et le développement des blés durs dépendent en grande partie de la variabilité interannuelle des précipitations. Cette variabilité peut entraîner une fluctuation et faiblesse de la proportion des terres emblavées des blés durs et la production en rapport avec les saisons. En effet, les mois que nous considérons cruciaux à la production du blé dur qui correspondent aux périodes les plus sensibles au stress hydrique dans la région des hautes plaines de l'Est Algérien sont les mois de mars et mai. Par ailleurs, le mois d'avril constitue un mois crucial durant les années sèches.

Dans cette étude, nous avons cartographié les zones potentielles pour la production du blé dur dans la région d'étude. Sous réserve d'étude complémentaire visant à préciser les zones potentielles par rapport à d'autres facteurs. Ces zones constituent 651 500 ha, et la partie intermédiaire constitue 378 900 ha. Par contre, les zones non potentielles constituent la grande partie de la zone d'étude avec 2330600 ha.

Vu l'étendu de la région d'étude qui se caractérise par une diversité géomorphologique et même pédologique, les résultats obtenus nous conduisent à réfléchir sur l'importance du renforcement et l'extension du réseau climatique actuel en adoptant les méthodes

statistiques et les outils S.I.G (cartes d'erreurs), tout en respectant les normes d'installations des stations météorologiques. Aussi, il serait intéressant de réfléchir sur le choix des variétés adaptées et des dates de semis propices pour la mise en place de la culture du blé dur dans la région d'étude. Enfin, il serait également intéressant de réaliser une cartographie des champs de pluies pour une période assez longue et déterminer les zones potentielles de production de blé dur dans la région par rapport à d'autres facteurs tout en utilisant la méthode de cartographie adopter dans cette étude.

---

# Références bibliographiques

- ALLARD D., MONESTIEZ P., VOLTZ M., COURAULT D., LAGACHERIE P.** (2002) - Spatialisation de données environnementales. Ed. INRA, Toulouse domaine Saint-Paul, France. pp. 3-10.
- ANTIL F., ROUSSELLE J., LAUZON N.**(2005) - Hydrologie. Cheminement de l'eau. 317 p.
- ARNAUD M. et EMERY X.** (2000) - Estimation et interpolation spatiale, Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques, Hermes science Europe, 219p.
- BAHLOULI F., BOUZERZOUR H et BENMAHAMMED A.** (2008) -Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, (1).pp 31-39.
- BANTA, R.M.** (1990) - The role of montain flows in making clouds, *Atmospheric Processes over complex terrain*, Meteor.Monogr., No 45, Amer, Meteor.Soc. p.173-228
- BAILLARGEON S.** (2005) - Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Thèse M.Sc. Université Laval-Québec, 137p.
- BALDY C.** (1974) - Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques. Leurs influences sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. Rapport, ITGC. 72p.
- BALDY C.** (1993) - Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en Méditerranée occidentale. Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéenne diversité génétique et amélioration variétale. Ed. INRA, Paris (les colloques, n°64), 433 p.
- BARANCOURT, C.** (1990) - Etude de l'intermittence et de la variabilité des champs de précipitation par une approche stochastique. Thèse. Doct, Université Joseph Fourier-Grenoble I, 187p.
- BEGUIN M. et PUMAIN D.,** (2003) - La représentation des données géographiques : statistique et cartographie. Ed.Armand Colin- France, 192p.
- BENICHOU P et LE BRETON O,** (1987) - Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques: la méthode Aurelhy. *Agrométéorologie des régions de moyennes montagnes*. Coll. INRA. publ., n° 3, Paris, pp. 51-68.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J-L., LAPLACE D., JOANNIS C.** (2000)- Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris (France) : Tec et Doc, 808 p.
- BOULANGER, F.** (1990) - Modélisation et simulation de variables régionalisées par des fonctions aléatoires stables. Thèse Doct, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 385 p.

- BOYELDIEU J.** (1981) - Les cultures céréalières. Nouvelle encyclopédie des connaissances agricoles, Ed. Hachette, 256 p.
- BOYER J.S.** (1985) - Water transport. Ann. Plant physiology, n°36, pp 473-516.
- BROWN S.C. , GREGORY P.J. et WAHBI A.** (1985) - Drought tolerance in winter cereals. Proceedings of the international workshop. Capri. Italy. pp 20-21.
- CASENAVEA et VALENTIN C.-** (1989) Les états de surface de la zone Sahélienne, influence sur l'infiltration. Ed. Orstom, 229 p.
- CASTANY G.,** (1963) - Traité pratique des eaux souterraines : élément d'hydrologie de surface. Ed. DUNOD Paris, pp. 3-106.
- CHOISNEL E.** (1986) -Moyens d'investigation. Séminaire : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne - Toulouse 16-17. Ed. INRA Paris, Coll. INRA N° 39, Paris, pp. 175-194.
- CHOISNEL E. et SEGUIN B.** (1986) - Agrométéorologie des régions de montagnes. Problèmes d'échelle et réseaux météorologiques en zone de moyenne montagne. Coll., INRA., publ., n° 3, Paris, pp. 37-49.
- COURAULT D et RUGET F.** (2001) - Impact of local climate variability on crop model estimates in the South-East of France. Ed. Climate Research, vol. 18, pp. 195-204.
- DAGNELIE P.** (1973) - Théorie et méthode statistique applications agronomiques. Ed. Presses de Gembloux, Belgique, Vol. 2, 458p.
- DE BLOMAC F., GAL R. , HUBERT M., RICHARD D et TOURRET C.** (1994)- Conception et application en géomatique. Ed. Hermes.248p.
- DENEGRE J., et SALGE, F.** (2004) Les systèmes d'information géographique. Ed. PUF- Paris. 128 pages.
- DELEUZE J.** (2005) - Application pour l'évaluation des effectifs : le Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.).Ed. Laboratoire (DRD), EID Méditerranée, 370p.
- DELHOMME J.P.** (1976). - Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse. Doct, Université de Pierre et Marie Curie- Paris, 129p.
- DIDIER M.** (1992) - Utilité et valeur de l'information géographique. Ed. Econo- Paris. 255p.
- DOMINGUES RAMOS M.** (2002) - Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs. Thèse. Doct., Uni. Grenoble, 165 p.
- DOUGUEDROIT A.** (1986) - Les topoclimats thermiques des montagnes. Séminaire. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne - Toulouse 16-17 Avril 1986. Coll. INRA n°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp. 175-194.
- DURU M .** (1986) - Climat et croissance de l'herbe pour récolte en fourrage sec dans les Pyrénées centrales. Séminaire : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne - Toulouse 16-17 Avril 1986. Coll. INRA N°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp. 317-332.
- ESTIENNE P et GODARD A.** (1970) - Climatologie. Ed. Colin Armand, Coll. Librairie Armand COLIN, Paris, 366 p, pp 67-69.

- GILLIOT J.-M.** (2000) - Introduction aux systèmes d'information géographique. Paris, p 110.
- HALIMI A.** (1980) - L'atlas Blideen, climat et étages végétaux. Ed. OPU. Alger. 523p.
- FELIACHI K.** (2000) - Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. Acte du 1<sup>er</sup> symp. Inter. Filiale blé. OAIC. pp 21-28.
- HA RRIS H.C. COOPER, P.J.M, et PALA, M.** (1991) - Soil and crop management for improved water use efficiency in rainfed areas, ICARDA.
- HEUSCH B.** (1970) - Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-rif occidental. SFRF, Maroc. Tome 12. 176p.
- KOTESWARAM P.** (1974) - Climat et météorologie. Edit. ISBN. U.N/E/S.C.O. Paris, pp. 29-52.
- KYRIAKIDIS, P.C. et JOURNAL, A.G.** (1999) - Geostatistical space-time models: a review. *Mathematical Geology*, Vol. 31, No. 6, 651-684.
- LAFARGE M.** (1986) - Principaux effets du climat sur la croissance et le développement des céréales en altitude dans le Massif central. Séminaire : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. Coll. INRA N°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp 287-300.
- MINISCLOUX F., ANQUETIN S., CREUTIN, JD.** (2001) - Geostatistical analysis of orographic rainbands. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 40., No 11, p.1835-1854
- MINVIELLE E et SOUIAH S.-A.** (2003) - L'analyse statistique et spatiale : statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Ed. Temps-Paris. 284p.
- MONNEVEUX P. et BELHASSEN E.** (1996) - The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant growth regulation*, n°20, pp 85-92
- MOUCHIROUD D.** (2002) - Mathématiques : Outils pour la Biologie, Deug SV1 – UCBL, pp 13-19.
- MOUHOUCHE B.** (1997) - Gestion rationnelle des irrigations de complément des cultures de légumineuses alimentaires et des céréales. *Revue semestrielle* n°01, pp 21-23.
- MOULE C.** (1980).- Céréales techniques d'avenir, phytotechnie spéciale. Ed. la maison rustique, paris, 318 p.
- MUSY A.,** (2005) - Hydrologie générale : les précipitations. Ed. Hermes science Europe, pp. 1-8.
- OKE T. R.,** (1978) - Boundary Layer Climate. Ed. Methuen, London, 372p.
- PEGUY P.,** (1970) - Précis de climatologie. Ed. Masson et C<sup>ie</sup>, éditeurs 120, Boulevard Saint- Germain, Paris-VI<sup>ème</sup>, 468p.
- PANNATIER.,** (1998) - VARIOWIN2.2
- PORNON H.** (1992)- Les SIG: Mise En Oeuvre Et Applications, Ed. Hermes. 158p.
- ROCHE M.** (1963) - Hydrologie de surface. Coll. Orstom and Gauthier, Villars Paris, 429p.

- ROGERS R-R. et YAU, M.K.** (1989) - A short course in cloud physics. International series in Natural Philosophy, Vol. 113. Butterworth-Heinemann, USA, Third Edition, 290 p.
- ROSENBERG M.** (1969) - Hydrologie. Choix d'un modèle régional expliquant la répartition des précipitations annuelles dans l'espace en fonction des facteurs climatiques et topographiques. CRAC. Sci. pp 761-764.
- ROUX F.** (1991) - Les orages. météorologie des grains, de la grêle et des éclairs. Editions Payot, Paris, 354 p.
- SEGUIN B.** (1986) -Rapport de synthèse. Inventaire des données. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. Toulouse 16-17 Avril 1986. Coll. INRA n°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp. 35-36.
- SEGUIN B.,** (1986) - Rapport de synthèse – Thème : Inventaire des données. Séminaire : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne - Toulouse 16-17 Avril 1986.Coll. INRA N°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp. 35-36.
- SEGUIN B., ASSAD E., FRETEAUD JP., IMBERNON J., KERR YH., LAGOUARDE JP.** (1989) - Use of meteorological satellite for balance monitoring in sahelian regions.Ed. J. Remote. Sens., vol.10, pp.1001-1017.
- SELTZER P.** (1949) - Le climat de l'Algérie. Alger. 219p.
- SEMCHEDDINE N. (2009) - Utilisation de la discrimination isotopique du carbone comme critère de sélection du blé dur (triticum durum desf) en relation avec le bilan hydrique. Thèse. Magister. Uni. Setif. 129p.**
- SMADHI D.** (2002) - Etude agroclimatique des grandes cultures pluviales en régions semi-arides. Cas des hauts plateaux telliens de l'Est d'Algérie, Thèse magister. INA.113p.
- TARDIEU F., AMEGLIO T. et BREDA N.**(1995) -Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse. Actes de l'école des chercheurs INRA. Bioclimatologie.
- TIERCELIN J.** (1998) -Traité d'irrigation. Ed. Lavoisier, Paris, 993 p.
- TRIPLET J-P. et ROCHE, G.** (1986) - Météorologie générale. Météo-France, 3ème édition,Trappes, 317 p.
- VARGAS-GUZMAN, J.A., MYERS D.E. et WARRICK A.W.** (2000) - Derivates of spatial variances of growing windows and the variogram. Mathematical Geology, Vol. 32, No. 7, 851-871.
- VERNET A., MOUSSET P. et SAGLIO P.** (1967) - Nutrition azotée et consommation en eau d'un blé irrigué sous le climat tunisien, bull. ENSA, Tunisie, n° 19, pp 3-6.
- WARDLAW I.F.** (2002) - Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment. Ann. Bot., 90, 469-476.

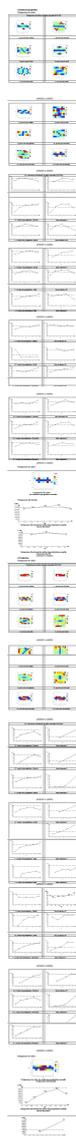
# Annexes

## ANNEXE 1 : TABLEAU DES DONNEES

Tableau 1 : Caractéristiques des stations climatiques de la région d'étude ainsi que le chiffre attribué à chaque station

**Apport de la cartographie numérique sur l'étude de l'influence des précipitations sur la production du blé dur**

Code attribué à chaque station	wilaya	Nom de station	Longitude (Dégré)	Latitude (Dégré)	Altitude (m)
1	B.B.A	EL MEHIR	36,13	4,37	550
2	B.B.A	B.B.A	36,00	4,66	928
3	B.B.A	GHAFSITIANE	35,93	4,67	900
4	B.B.A	EL HAMADIA	35,97	4,75	850
5	B.B.A	BOUAZIZ	36,27	4,82	850
6	B.B.A	BORDJ GHDIR ANRH	35,91	4,90	1054
7	B.B.A	BORDJ GHDIR ONM	35,88	4,90	1050
8	B.B.A	RAS EL OUED	35,97	5,03	1000
9	BATNA	M'DOUKAL	35,12	5,17	376
10	BATNA	BARIKA	35,33	5,35	460
11	BATNA	BITAM	35,32	5,37	474
12	BATNA	O.S.SLIMANE	35,47	5,45	622
13	BATNA	SEGGANA	35,37	5,63	673
14	BATNA	RAS EL AYOUN	35,68	5,65	880
15	BATNA	MEROUANA	35,63	5,91	1000
16	BATNA	MENAA	35,17	6,02	1000
17	BATNA	BATNA A	35,71	6,03	468
18	BATNA	BOUZINA	35,28	6,12	1350
19	BATNA	ATTOUTA	35,55	6,18	471
20	BATNA	TIFELFEL	35,62	6,23	800
21	BATNA	EL MADHER	35,62	6,37	913
22	BATNA	TOUFANA	35,48	6,60	1040
23	BATNA	BOULHILET	35,73	6,67	985
24	CONSTANTINE	A.SMARA	36,27	6,50	680
25	CONSTANTINE	CONSTANTINE	36,28	6,63	419
26	KHENCHELA	KHENCHELA	35,47	7,08	983
27	MILA	FERDJIOUA	36,40	5,93	580
28	MILA	AIN TRIK	36,28	5,97	1100
29	MILA	BENI GUECHA	36,38	6,00	550
30	MILA	CHELGHOU M LAID	36,16	6,16	768
31	O.E.B	BIR CHOUHADA	35,90	6,30	800
32	O.E.B	A.KERCHA	35,90	6,70	780
33	O.E.B	SIGUS	36,13	6,78	820
34	O.E.B	A.EL BORDJ	36,03	6,89	780
35	O.E.B	O.E.B	35,87	7,11	889
36	O.E.B	AIN BABOUCHE	35,93	7,18	893
37	O.E.B	MEDFOUN	35,86	7,23	900
38	O.E.B	KSAR SBAHI	36,08	7,27	850
39	O.E.B	AIN EL BEIDA ANRH	35,80	7,40	1004
40	O.E.B	AIN EL BEIDA ONM	35,78	7,40	1000
41	O.E.B	MESKIANA	35,63	7,67	970
42	SETIF	GUENZET	36,32	4,83	1100
43	SETIF	OURTILEN	36,45	4,86	1020
44	SETIF	MAOKLANE	36,40	5,07	950
45	SETIF	BOUGAA	36,32	5,10	886
46	SETIF	RASFA	35,75	5,23	1100
47	SETIF	SETIF	36,18	5,25	443
48	SETIF	SALEH BEY	35,85	5,28	978
49	SETIF	A.OULMANE	35,92	5,28	960
50	SETIF	BOUTALEB	35,70	5,32	960
51	SETIF	GUELLAL	36,03	5,33	908
52	SETIF	TIZI NBECHAR	36,43	5,33	900
53	SETIF	MEGHRES	36,33	5,35	442



## 1 Résidus des précipitations

**Apport de la cartographie numérique sur l'étude de l'influence des précipitations sur la production du blé dur**

Types d'étude	Mois	Variogramme expérimental			
		Espace entre classe	Nombre de classe	Angle d'anisotropie	Angle de tolérance
ETUDE DES RESIDUS	Janvier	0,75	4	0°	45°
	Février	0,35	4	0°	45°
	Mars	0,51	4	135°	45°
	Avril	0,70	3	0°	45°
	Mai	0,45	4	90°	45°
	Juin	0,46	3	0°	45°
	Juillet	0,81	4	45°	45°
	Août	0,18	3	90°	45°
	Septembre	0,90	3	90°	45°
	Octobre	0,50	3	135°	45°
	Novembre	0,36	4	0°	45°
	Décembre	0,89	3	0°	45°

Types d'étude	Mois	Variogramme théorique (Modèle)					
		Modèle	I.G.F.	Effet de pépite	Palier/ Puissance	Porté/ Pente (mm/an) <sup>2</sup> /°	Rapport d'anisotropie
ETUDE DES RESIDUS	Janvier	Linéaire	2,28 e <sup>-2</sup>	124,20	0,35	125,05	5,88
	Février	Gaussien	4,31 e <sup>-2</sup>	54,00	150,00	1,33	2,32
	Mars	Gaussien	3,45 e <sup>-2</sup>	34,16	32,33	0,76	1,11
	Avril	Gaussien	2,76 e <sup>-2</sup>	60,97	57,33	2,10	2,56
	Mai	Gaussien	1,57 e <sup>-2</sup>	46,50	42,42	0,34	1,40
	Juin	Exponentiel	1,33 e <sup>-2</sup>	14,95	1,22	26,98	4,00
	Juillet	Exponentiel	8,41 e <sup>-3</sup>	4,60	1,17	16,89	50,00
	Août	Gaussien	3,51 e <sup>-2</sup>	26,98	41,96	0,01	1000
	Septembre	Gaussien	1,48 e <sup>-2</sup>	50,53	20,87	2,70	1,06
	Octobre	Exponentiel	3,01 e <sup>-2</sup>	34,63	28,58	1,31	2,00
	Novembre	Linéaire	1,17 e <sup>-2</sup>	0,00	129,26	0,27	2,70
	Décembre	Exponentiel	2,51 e <sup>-2</sup>	163,30	311,60	2,70	5,26

**Paramètres du variogramme théorique**

Variogramme Paramètres	Variogramme théorique (Modèle)					
	Modèle	I.G.F.	Effet de pépite (mm/an) <sup>2</sup>	Palier ou Puissance	Porté ou Pente (mm/an) <sup>2</sup> /°	Rapport d'anisotropie
Résidus de pluviométrie annuelle	Gaussien	2,17 e <sup>-3</sup>	6497,50	1974,50	2,41	2,56

**2 Précipitations**

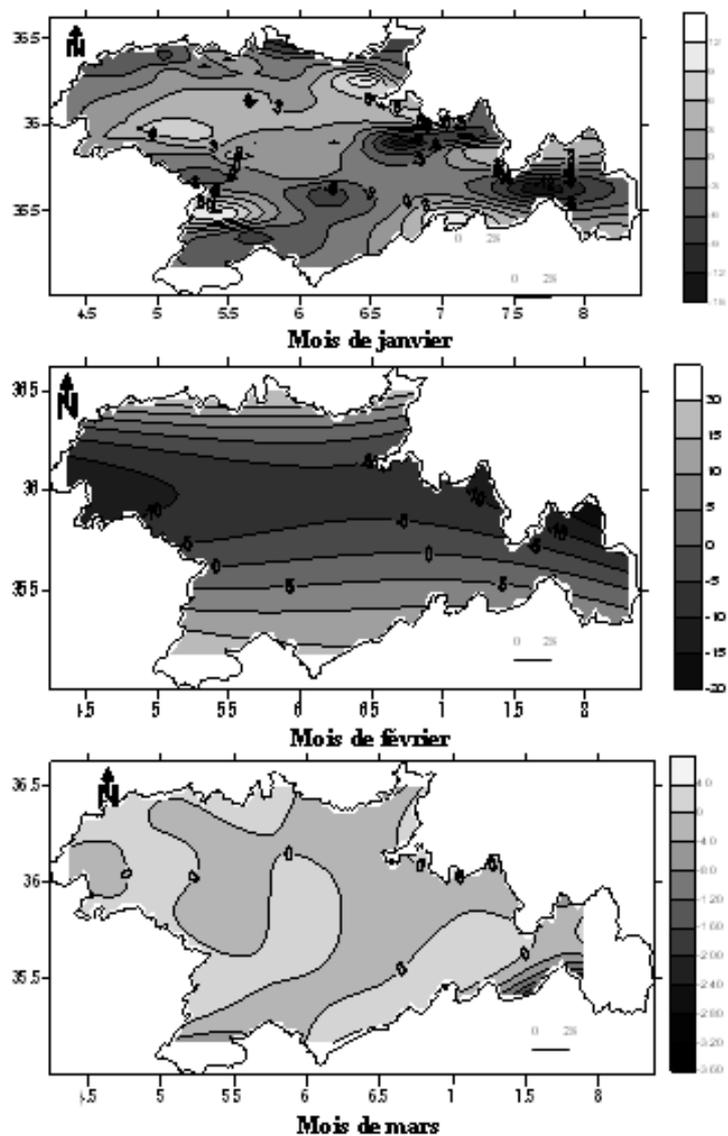
Types d'étude	Mois	Variogramme expérimental			
		Espace entre classe	Nombre de classe	Angle d'anisotropie	Angle de tolérance
ETUDE DES PLUIES	Janvier	0,92	4	0°	25°
	Février	0,93	4	0°	25°
	Mars	0,89	4	0°	25°
	Avril	0,92	4	0°	25°
	Mai	0,55	4	0°	25°
	Juin	0,12	5	0°	25°
	Juillet	0,42	4	45°	25°
	Août	0,21	5	90°	25°
	Septembre	0,35	5	0°	25°
	Octobre	0,15	4	90°	25°
	Novembre	0,90	4	0°	25°
	Décembre	0,89	4	0°	25°

Types d'étude	Mois	Variogramme théorique (Modèle)					Rapport d'anisotropie
		Modèle	I.G.F.	Effet de pépite	Palier / Puissance	Porté / Pente (mm/an) <sup>2</sup> /°	
ETUDE DES PLUIES	Janvier	Linéaire	4,07 e <sup>-2</sup>	91,10	1,86	40,14	5,26
	Février	Linéaire	4,26 e <sup>-2</sup>	11,55	1,58	62,16	4,76
	Mars	Linéaire	1,88 e <sup>-1</sup>	53,88	0,83	67,45	4,35
	Avril	Linéaire	2,95 e <sup>-2</sup>	85,00	0,71	122,04	9,09
	Mai	Linéaire	1,46 e <sup>-2</sup>	8,56	00,67	67,14	2,50
	Juin	Gaussien	6,25 e <sup>-3</sup>	0,94	18,34	0,60	2,56
	Juillet	Linéaire	1,22 e <sup>-2</sup>	6,98	0,19	1,45	4,55
	Août	Sphérique	6,19 e <sup>-2</sup>	0,00	27,90	0,68	1,80
	Septembre	Linéaire	2,01 e <sup>-2</sup>	0,68	0,63	13,49	2,78
	Octobre	Gaussien	7,90 e <sup>-3</sup>	5,89	30,00	0,55	1,30
	Novembre	Linéaire	1,11 e <sup>-1</sup>	37,62	1,56	23,04	5,56
	Décembre	Linéaire	1,21 e <sup>-1</sup>	123,98	1,99	110,99	4,35

#### Paramètres du variogramme théorique

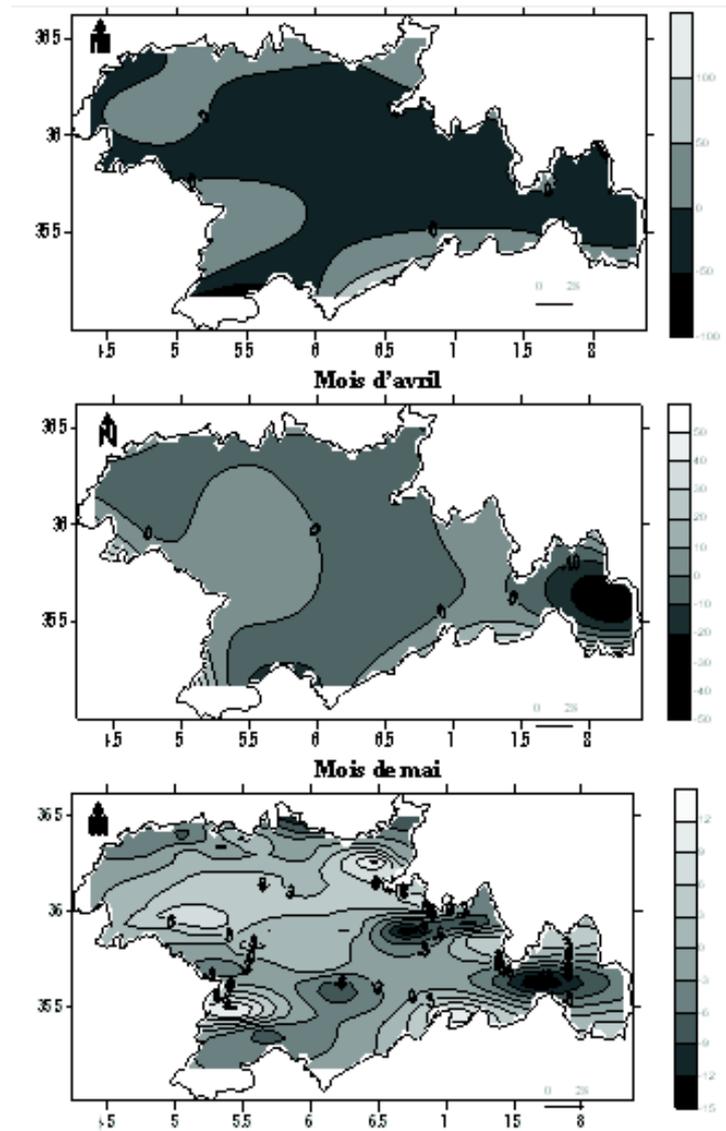
Variogramme			Variogramme théorique (Modèle)			
Paramètres	Modèle	I.G.F.	Effet de pépite (mm/an) <sup>2</sup>	Palier ou Puissance	Porté ou Pente (mm/an) <sup>2</sup> /°	Rapport d'a
Pluviométrie annuelle	Linéaire	$3,00 \text{ e}^{-2}$	1156,00	1,85	1091,13	5,26

## ANNEX 3

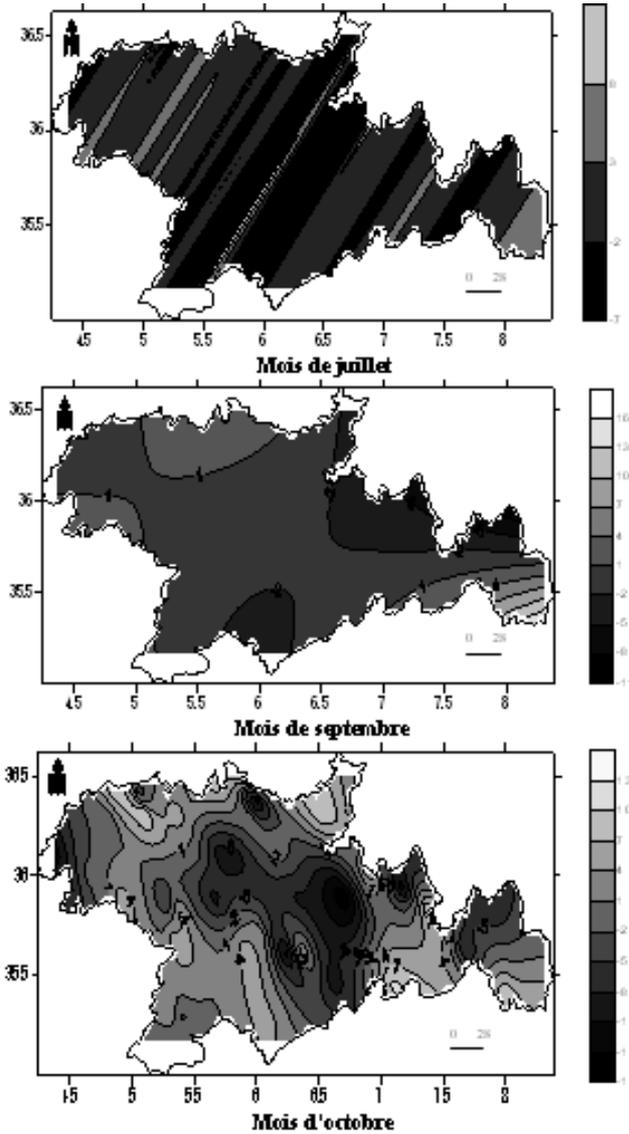


Cartes des résidus de précipitations mensuelles

## ANNEXE 3 (SUITE1)



**ANNEXE 3 (SUITE2)**



ANNEXE 3 (SUITE3)

