

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المدرسة الوطنية العليا للعلوم الفلاحية الحراش - الجزائر
Ecole Nationale supérieure d'Agronomie El Harrach- Alger

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Sciences Agronomiques
Option : Hydraulique Agricole

THEME

**Analyse et cartographie des paramètres
climatiques (précipitations, températures) et
incidences sur la délimitation des céréales
pluviales des Hauts Plateaux de l'Est algérien**

Réalisé: M. BACHIR Hakim

Jury:

Président : M. MOUHOUCHE B. Professeur (ENSA)
Directeur de thèse : M. SEMAR A. Professeur (ENSA)
Examineurs : M. HEDDAM S. Maître de conférences A (Université de 20
Aout 1955, Skikda)
Mme SMADHI D. Maître de recherche A (INRAA)

Année Universitaire : 2017/2018

DEDICACES

À LA MÉMOIRE DE MON PÈRE ;

À MA MÈRE ;

**À MES FRÈRES ET SŒURS ET TOUTE LA GRANDE
FAMILLE ;**

À MA FEMME ET MES ENFANTS ;

**À MES AMIS (ES) ET À CEUX QUI M'AIMENT ET
QUE J'AIME ;**

**À LA MÉMOIRE DE H. MESSOUS QUI A PLEINEMENT
PARTICIPÉE À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL,
JE LUI DÉDIE CE TRAVAIL.**

HAKIM

REMERCIEMENTS

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 :

A

- Monsieur **Le Professeur A. SEMAR**, d'avoir accepté la direction de mes travaux de thèse avec beaucoup de sympathie et de bonne humeur. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour le temps qu'il a consacré à l'encadrement de cette étude, pour ces encouragements et pour ces précieuses recommandations qui m'ont guidé dans la réalisation de cette présente étude ;

- Monsieur **Le Professeur B. MOUHOUCHE**, pour avoir gentiment accepté de présider le jury et d'avoir toujours été présent pour apporter son aide. Je ne saurais oublier Monsieur **S. HEDDAM** et Madame **D. SMADHI**, Examineurs, qui ont accepté de lire et d'évaluer cette thèse avec beaucoup d'intérêt ;

- **L'O.N.M, L'A.N.R.H, l'I.N.C.T, l'I.T.G.C et l'I.N.S.I.D** qui ont mis à ma disposition les données climatiques et les cartes ;

- Tous les cadres de **l'I.N.S.I.D** et en particulier **C. NEGRI**, Directeur Général, les cadres travaillant au département d'Agrométéorologie, qui m'ont aidés et soutenus notamment **S. Mallou** chef de département et **Kellou** technicien supérieur en cartographie ;

- **l'I.N.R.A.A** qui m'a fourni l'aide logistique nécessaire pour l'achèvement de ce modeste travail, en particulier **Le Professeur F. Chehat** ancien Directeur, **A. Mazzari** co-auteur dans la Publication, **D. SMADHI**, qui m'a beaucoup orienté, sans oublier les chercheurs et cadres de **l'INRAA** qui m'ont apporté aidés et soutenus ;

- les cadres de **l'ITGC** en particulier **M. Zeghouane** Directeur général, et **Mm Dekkiche N.** ;

- Et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.

Table des matières

Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations	VII
Résumé	VIII
Introduction générale	01
Premier chapitre : Synthèse bibliographique	
1. Aperçu général sur les céréales	05
1.1. Place des céréales et échanges mondiaux	05
1.2. Situation de la filière céréaliculture en Algérie	06
1.3. Zonage agroclimatique	07
1.4. Répartition des zones céréalières en Algérie	08
2. Les précipitations	09
2.1. Genèse des pluies et régimes pluviométriques	10
2.2 Régimes des précipitations en régions méditerranéennes et en Algérie	11
2.3. Facteurs de variation des précipitations	12
2.3.1. Effet du relief et de l'exposition	12
2.3.2. Effet de l'emplacement géographique	12
2.3.3. Effets du vent	13
2.3.4. Effets de l'humidité de l'air et de la température	13
2.3.5. Effets du végétal	13
2.4. Mesures et analyses des précipitations	14
2.5. Variabilité spatiale des pluies et densité de points de mesures	14
2.6. Répercussion des précipitations sur les céréales	15
2.7. Réponse des céréales à l'eau par phase phénologiques	16
3. Température de l'air	16
3.1 Facteurs de variation des températures	17
3.2 Effet des basses températures sur les céréales	18
4. Approche statistique	22
4.1. Statistiques élémentaires descriptives	22
4.2. Méthodes de comblement des lacunes dans les séries climatiques	23

4.3. Fonction de corrélation	24
4.4. Régression linéaire multiple	24
4.5. Spatialisation et méthodes d'estimation des données climatiques	25
5. Bases conceptuelles de la géostatistique	26
5.1. Fonction aléatoire	27
5.2. Fonction variogramme	27
5.2.1. Variogramme et caractéristique	28
5.2.2. Ajustement variographique	29
5.2.3. Notion de dérive	29
5.3. Krigeage	30
6. Systèmes d'information géographique (S.I.G)	31
6.1. Base et banque de données spatiales et descriptives	31

Deuxième chapitre : Matériel et méthodes

1. Région d'étude et milieu naturel	33
1.1. Morphologie du relief et limites naturelles	33
1.2. Ressources hydriques et situation de l'irrigation dans la région	35
1.2.1. Ressources en eaux superficielles	35
1.2.2. Ressources en eaux souterraines	36
1.2.3. Situation de l'irrigation dans la région	37
2. Approche méthodologique	39
2.1. Prospection et recueil des données	39
2.1.1. Données climatiques	40
2.1.2. Analyses des données climatiques	41
2.1.3. Modélisation par régression Linéaire Multiple et tests de validation	42
2.2. Démarche adoptée pour la cartographie numérique des données climatiques	44
2.2.1. Cartographie des températures	44
2.2.2. Cartographie des pluies	45
2.2.3. Analyse géostatistique des données	45
2.2.4. Analyse spatiale des données physiques	46
2.2.4.1. Modèle numérique du terrain (M.N.T)	46
2.2.4.2. Carte des pentes	46
2.2.4.3. Carte des sols	46
2.2.5. Vision globale sur les outils utilisés	47

Troisième chapitre : Résultats et discussion

1. Aperçu et lecture sur des données statistiques	49
2. Données climatiques	51
2.1. Analyse des données climatiques	51
2.2. Description des données climatiques	52
2.2.1. Précipitations annuelles	55
2.2.2. Précipitations mensuelles	57
3. Analyse et modélisation par régression linéaire multiple	62
3.1. Pluies annuelles	62
3.2. Précipitations mensuelles	67
3.2.1 Effet de la longitude	67
3.2.2. Effet de la latitude	68
3.2.3. Effet de l'altitude	69
3.2.4. Effet de la constante	70
3.2.5. Coefficient de corrélation	70
4. Cartographie numérique des précipitations	71
4.1. Précipitation annuelles	71
4.1.1. Variographie et interpolation	72
4.1.2. Détection des erreurs du réseau	75
4.2. Précipitations mensuelles	77
4.3. Les gelées	85
4.3.1. Les gelées annuelles	85
4.3.2. Cartographie de la répartition spatio-temporelle des gelées annuelles	86
4.3.3. Les gelées mensuelles	88
4.3.3.1. Cartographie de la répartition spatio-temporelle des gelées mensuelles	88
4.4. Cartographie de la zone apte à la céréaliculture	90
Conclusion Générale	91
Références bibliographiques	92

Liste des figures

Figure 1. Principaux producteurs de blé dur en million de tonnes dans le monde au cours de la campagne céréalière 2012/2013 (CIC, 2013).	06
Figure 2. Les importations des céréales et de ces dérivés en Algérie	07
Figure 3. Températures qui causent des dommages par les gels climatiques à différents stades de croissance des blés	20
Figure 4. Ajustement d'un variogramme expérimental à un variogramme théorique	28
Figure 5. Unités morphologiques de la région d'étude	33
Figure 6. Modèle Numérique de Terrain de la région d'étude	34
Figure 7. Carte de la répartition du chevelu hydrographique et des points d'eau	36
Figure 8. Répartition géographique des espaces agricoles irrigués	38
Figure 9. Localisation spatiale des stations climatiques retenues	41
Figure 10. Production céréalière pour la période 1962-2012	49
Figure 11. Production et consommation de blé dur en Algérie durant la période 1991- 2009 (CIC, 2010)	51
Figure 12. Répartition des stations pluviométriques dans la région d'étude	53
Figure 13. Pluies annuelles de l'ensemble des stations réparties sur la région d'étude période (1986-2007)	55
Figure 14. Répartition des stations par classes de pluies annuelles	56
Figure 15. Répartition des stations par classes de pluies (mois septembre)	58
Figure 16. Répartition des stations par classes de pluies (mois d'octobre)	58
Figure 17. Répartition des stations par classes de pluies (mois de novembre)	59
Figure 18. Répartition des stations par classes de pluies (mois de décembre)	60
Figure 19. Répartition des stations par classes de pluies (mois de janvier)	60
Figure 20. Répartition des stations par classes de pluies (mois de février)	60
Figure 21. Répartition des stations par classes de pluies (mois de mars)	61
Figure 22. Répartition des stations par classes de pluies (mois d'avril)	61
Figure 23. Répartition des stations par classes de pluies (mois de mai)	62
Figure 24. Répartition des stations par classes de pluies (mois de juin)	62
Figure 25. Carte des pentes de la région d'étude	64
Figure 26. Corrélation entre les précipitations et l'altitude	66
Figure 27. Comportement des coefficients de la longitude à l'échelle mensuelle	67
Figure 28. Comportement des coefficients de la latitude à l'échelle mensuelle	68
Figure 29. Comportement des coefficients de l'altitude à l'échelle mensuelle	69
Figure 30. Comportement des constantes à l'échelle mensuelle	69
Figure 31. Courbe des coefficients de corrélation de la régression multiple à l'échelle mensuelle	70

Figure 32. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes annuelles selon la direction Nord/Sud	71
Figure 33. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes annuelles selon la direction Est /Ouest	72
Figure 34. Carte de répartition spatio-temporelle des précipitations annuelles (1986-2007)	73
Figure 35. Variogramme directionnel des résidus des précipitations annuelles	74
Figure 36. Carte des résidus de précipitations annuelles	75
Figure 37. Répartition idéale en station pluviométrique maillage carré serré (15Km ²)	76
Figure 38. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de février selon la direction Nord/Sud	77
Figure 39. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de février selon la direction Est /Ouest	77
Figure 40. Répartition des précipitations du mois de février de la région d'étude	78
Figure 41. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de mars selon la direction Est /Ouest	78
Figure 42. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de mars selon la direction Est /Ouest	79
Figure 43. Répartition des précipitations du mois de mars de la région d'étude	80
Figure 44. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois d'avril selon la direction Est /Ouest	80
Figure 45. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois d'avril selon la direction Est /Ouest	81
Figure 46. Répartition des précipitations du mois d'avril de la région d'étude	82
Figure 47. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de Mai selon la direction Est /Ouest	82
Figure 48. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes du mois de Mai selon la direction Est /Ouest	83
Figure 49. Répartition des précipitations du mois de mai de la région d'étude	84
Figure 50. Gelées minimales, moyennes et maximales	85
Figure 51. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes annuelles	86
Figure 52. Répartition spatio-temporelle des gelées maximales annuelles	87
Figure 53. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de janvier	88
Figure 54. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de février	88
Figure 55. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de mars	89
Figure 56. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois d'avril	89
Figure 57. Répartition des zones aptes à la céréaliculture dans la région d'étude	90

Liste des tableaux

Tableau 01. Réponse des stades phénologiques à la température	19
Tableau 02. Symptômes et dommages causés par le gel aux stades de croissance printanière des blés	20
Tableau 03. Allocation en eau d'irrigation pour l'horizon 2010-2025 dans le cadre de PNE	37
Tableau 04. Alerte à la sécheresse et superficies irriguées dans la zone d'étude	39
Table 05. Données recueillies relatives à la région d'étude	40
Tableau 06. Superficies des sols par classes	47
Tableau 07. Etat des lieux des superficies, des productions et des rendements en céréales et en blé dur en Algérie durant la période (1984-2006)	50
Tableau 08. Situation géographique des stations météorologiques	54
Tableau 09. Statistiques descriptives et test de normalité	57
Tableau 10. Coefficients de RLM et les tests de validation	64
Tableau 11. Distribution des pentes dans la région d'étude	65
Tableau 12. Variogrammes théoriques et tests de validation	71

Liste des abréviations

A.E.P : Alimentation en Eau Potable

Alt : Altitude

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydriques

C.I.C : Conseil International des Céréales

D.H.A : Direction de l'Hydraulique Agricole

E : Erreurs

E.N.SA : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

ha : Hectare

FAO : Organisation pour l'Agriculture et l'Alimentation

FAOstat : Bulletin de statistique de l'Organisation pour l'Agriculture et l'Alimentation

I.G.F: Indicatif Goodness of Fit

I.N.C.T : Institut National de la Cartographie et de la Télédétection

I.N.S.I.D : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage

Lat : Latitude

Long : Longitude

M.A.D.R.P : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de Pêche

M.N.T : Modèle Numérique de Terrain

M.R.E : Ministère des Ressource en Eau

N.O.A.A: National Oceanic Atmospheric Administration

O.N.M : Office Nationale de Météorologie

P : Pluie/ précipitation liquide

P.N.E : Programme National de L'Eau

q : Quintaux

q/ha : Quintaux par hectare

R : Coefficient de corrélation

R.L.M : Régressions Linaires Multiple

S.A.U : Surface Agricole Utile

S.I.G : Système d'Information Géographique

DSASI : Direction de statistiques agricoles et des systèmes informatiques

ملخص

التحديات الاقتصادية المتعلقة بمجالات الزراعة و الصناعة، أدى بنا إلى اعتماد الأسلوب الأنسب لتمثيل المطر على الخريطة المكانية و الزمانية خاصة في المناطق التي تمتاز بتوزيع أمطار غير متجانس بالإضافة إلى فترات الجفاف.

تعتبر أساليب تقدير كميات الأمطار بإستخدام عدد من الأدوات (الإحصاء، الإحصاء الجغرافي، الخرائط الرقمية الطريقة الأنجع لتمثيل الأمطار في المنطقة الشرقية للهضاب العليا الجزائرية.

في هذه الدراسة، النهج المقترح لتوصيف الأمطار مبني على سلسلة البيانات للفترة الزمنية 1986-2007 المنتقات من 65 محطة قياس الأمطار.

يستند هذا المنهج على طريقتين متكاملتين الجيو إحصاء و المعادلات التراجع الخطية و العلاقة المباشرة بين منسوب الأمطار و المعلومات الجغرافية خطوط الطول، العرض و الإرتفاع . يشير التحليل الإحصائي أن الأمطار

السنوية تتراوح بين 127 و 752 ملم ، و أن التوزيع السنوي يتخذ شكل مفلطح التجانف

تشير أيضا النتائج أن إتجاه التدرج شمال/جنوب و أن القوة العرضية هي المعلم الأكثر تأثيرا مع معامل يساوي 261.25 خلافا لخط الطول مع معامل 17.06 أما الإرتفاع 0.04 فليس له تأثير على هطول الأمطار.

بالإضافة إلى ذلك هناك عوامل أخرى تأثر على الأمطار مثل كثافة الغطاء النباتي و درجة الحرارة و الكتلة الهوائية

التي تأثر سلبا على هيكل الأمطار علاوة على ذلك، فإن خريطة الأمطار تشير إلى المناطق التي يتراوح فيها

المنسوب بين 300 و 400 ملم تهيمن على 58 بالمائة من المساحة الكلية، في حين العصابات المطرية الأكبر

في 400 ملم تحتل 37 بالمائة من المساحة الكلية.

في هذه الدراسة تم أيضا تحيين خرائط للصقيع من أجل تحديد المناطق حيث وتيرة التجمد تمثل سبب عجز يمكن أن

يلحق الضرر على محاصيل الحبوب. وتبلغ المساحة المناسبة لزراعة الحبوب 10710 كيلومتر مربع

كلمات البحث

القمح - هطول الأمطار - الصقيع - رسم الخرائط الرقمية - جيوستاتستيكش - الانحدارات متعددة -

سهول عالية من شرق الجزائر

RESUME

Les défis économiques liés aux domaines de l'agriculture et de l'industrie, nous ont amenés à adopter la méthode la mieux adaptée pour représenter les paramètres climatiques sur le plan spatial et temporel. Cette représentation est importante en particulier dans les zones caractérisées par des périodes de sécheresse dues à une répartition pluviométrique hétérogène en plus des températures basses. Dans cette étude, une approche a été proposée pour la caractérisation annuelle des précipitations. Des séries de données pour la période 1986-2007 ont été recueillies auprès de 65 stations de mesure des pluies. Cette approche est basée sur deux méthodes complémentaires (Régression Linéaire Multiple et Géostatistique), y compris la relation directe entre les précipitations et les paramètres géographiques (longitude, latitude et altitude). L'analyse statistique indique que les valeurs annuelles de précipitations varient de 127 à 752,2 mm et que leur distribution est Platykurtique. Les résultats montrent que la structure pluviométrique annuelle obéit principalement à un gradient nord / sud, et la latitude est le paramètre géographique le plus influent avec un coefficient de 261,25 contrairement à la longitude (17,06) et l'altitude (0,04) qui ont un effet non significatif sur les précipitations. En outre, d'autres facteurs tels que la végétation, la température et le mouvement de la masse d'air affectent négativement la structure des précipitations. La carte des précipitations indique que les bandes de pluie allant de 300 à 400 mm dominent, avec 58% la superficie totale de l'étude, alors que celles supérieures à 400 mm occupent 37% de l'aire totale. Les cartes des gelées ont été réalisées pour identifier les couloirs gélifères. Ces derniers entraînent des dommages sur les cultures céréalières. Sur la base du croisement des couches thématiques, à l'aide de l'approche SIG, la superficie de la zone favorable à la céréaliculture est évaluée à 10710 km².

Mots clés

Blés, précipitation, gelées, Cartographie numérique, S.I.G, Régression linéaire multiple, Géostatistique, Hautes plaines de l'Est Algérien

ABSTRACT

The economic challenges related to the fields of agriculture and industry led us to adopt the best suited method to represent the rain on the spatial and temporal plan especially in areas characterized by heterogeneous rainfall distribution additionally to drought periods. The methods of analysis and estimation of rainfall, using a number of tools (statistics, geostatistics and digital mapping), provide the opportunity to represent the average rainfall fields in the eastern high plateaus region of Algeria. In this study, an approach was proposed for rainfall characterization. Data series for the period 1986–2007 were collected from 65 rain-gauging stations. This approach is based on two combined methods (geostatistic and multiple linear regression) including direct relationship between rainfall and geographical parameters (longitude, latitude and altitude). Statistical analysis indicates that the annual rainfall values ranges from 127 to 752,2 mm and that their distribution is platykurtic. Results show that yearly rainfall structure obeys mainly a north/south gradient, and latitude is the most influential geographical parameter with a coefficient of 261,25 contrary to the longitude (17,06) and altitude (0,04) which have a non-significant effect on precipitation. In addition, other factors such as vegetation, temperature and air mass movement affect negatively the rainfall structure. Moreover, the map of rainfall indicates that the rain bands ranging from 300 to 400 mm dominate 58 % of the total study area whereas rain bands greater than 400 mm occupy 37 % of the total study area. The maps of the frosts have been developed in order to determine the areas where the frequency of freezing represents a handicap and can cause damage on the cereal crops. Based on overlay map, using the GIS approach, the surface of the area favourable to cereals is estimated at 10710 km².

Keywords

Cereals, Precipitations, Frosts, digital mapping G.I.S, Multiple linear Regression, Geostatistic, Eastern High plateau of Algeria.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La faiblesse de la production agricole, due à des raisons naturelles objectives, telles que la rareté de l'eau, les conditions climatiques et la qualité des sols, conditionnent la fixation des priorités vitales dans l'affectation de la Surface agricole utile (SAU) et des moyens nécessaires quant à une production stable (Lopez-Bellido et *al.* 2000).

Actuellement, l'agriculture algérienne qui occupe environ 8,45 millions d'hectares dont 39,6% sont mis en jachère (RGA, 2003). A 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'importations en produits agricoles. Les grandes cultures couvrent au cours de ces 20 dernières années, 3,99 millions d'hectares dont les surfaces réservées aux céréales sont environ de 3,6 millions d'hectares en moyenne. La production céréalière est marquée par une stagnation sur une longue période.

Selon les statistiques du ministère de l'agriculture, la moyenne des rendements des céréales à l'échelle nationale a atteint 9,8 q/ha durant la période 1986 – 2006. Cependant, les rendements des blés durs avoisinent les 15 q/ha, au cours de ces 30 dernières années. D'après le Conseil international des céréales (C.I.C, 2013), l'Algérie importe en moyenne près de 2,7 millions de tonnes de blés dont près de 1,5 million de tonne de blé dur, plaçant ainsi l'Algérie parmi l'un des premiers pays importateurs de blé. La situation de dépendance que connaît notre pays vis-à-vis de l'étranger, pour satisfaire la demande de la population met en péril sa sécurité alimentaire et sa souveraineté (Kious et *al.* 2010). L'Algérie devrait être en mesure d'accroître sensiblement sa production vivrière d'ici l'an 2030, en n'utilisant que 12% d'eau en plus (F.A.O, 2015).

Dans un souci d'arriver à une amélioration des rendements afin d'atteindre des productions acceptables, des efforts sont consentis durant la période post coloniale, par une meilleure mécanisation, l'utilisation de nouveaux intrants et mis en place de quelques variétés nouvelles. La politique algérienne d'incitation à la production, à partir de l'an 2008, dans le cadre de la mise en place d'un dispositif de soutien des cultures de blés, a conduit à une augmentation des rendements moyens des blés de 8,4 q /ha à 13,4 q/ha, au cours de ces dix dernières années. Ces efforts n'ont pas apporté les résultats attendus et la production est restée tributaire des aléas climatiques notamment la pluviométrie (Smadhi, 2010). En effet, il s'agit d'une culture surtout pluviale dépendante de la variabilité du climat (Baldy, 1974). 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, 1993). 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 et par conséquent la sécurité alimentaire du pays. L'eau reste l'élément primordial sans lequel tout effort de production est voué à l'échec du fait qu'elle valorise mieux que tous les autres facteurs de production. Cette attention particulière accordée à l'eau est dictée par le fait que l'Algérie est un pays qui dispose d'un potentiel hydrique limité le plaçant de ce fait dans une situation critique à horizon 2025 (Smadhi, 2010).

Les variables aléatoires climatiques constituent donc 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 (Domingues Ramos, 2002). Le climat conditionne à la fois la distribution des espèces végétales et leur comportement en termes de croissance et de reproduction (Kramer et al. 2000). Les blés répondent non seulement aux valeurs mensuelles et annuelles des paramètres climatiques tels que la température moyenne ou les cumuls pluviométriques, mais ils sont également largement affectés par la variation temporelle de ces différents paramètres (Annicchiarico et al. 2005). Non seulement la sécheresse, les conditions climatiques de la saison froide sont régulièrement responsables de dégâts importants aux plantes pérennes et aux céréales (Brown et Blackburn, 1987). Les causes de dommage sont nombreuses et n'affectent pas toutes les espèces ou variétés avec la même sévérité (Fowler et Limin, 1997).

Dans ce contexte, afin de mettre en évidence les rapports céréales-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, tout en le considérant comme étant un facteur intrinsèque doté de caractéristiques définies et uniformes (Koteswaram, 1974). Les pluies et les températures fluctuent dans l'espace et le temps. Leurs valeurs et répartition sont affectées par de nombreux facteurs, y compris géographiques, à l'instar de la longitude, la latitude, l'altitude, la distance de la mer, les variations saisonnières comme le mouvement de l'humidité de l'air, la température, la pression atmosphérique et la topographie.

De nombreuses études ont été menées pour corréliser ces variables aux facteurs susmentionnés basés sur la modélisation mathématique (régression multiple, interpolations, etc.) comme une alternative pour améliorer l'estimation en utilisant les données fournies par les stations de mesure météorologiques disponibles (Marks et al. 2013; Gachon and Dibike,

2007 ; Dibike and Coulibaly, 2006 ; Lloyd, 2005; Naoum and Tsanis, 2004; Brunsdon et *al.* 2001; Goovaerts 2000; Johnson and Hanson, 1995; Hevesi et *al.* 1992).

Les précipitations pourraient être estimées de façon incorrecte si les variables topographiques influençant les précipitations ne sont pas prises en considération (Myoung-Jin et *al.* 2012). Cependant, les précipitations cumulées maximales ne coïncident pas nécessairement avec la plus haute altitude (Subyani and Al-Dakheel, 2009). Les précipitations peuvent être estimées dans l'espace à l'aide de méthodes d'interpolation avec des modèles mathématiques simples (inverse de la distance, analyse de la tendance de surface, cannelures et polygones de Thiessen, etc.). De plus, les précipitations peuvent être estimées par une méthode plus complexe reposant sur le krigeage. En fait, l'interpolation géostatistique est devenue un outil important en climatologie car elle tient compte de la variabilité spatiale et quantifie l'incertitude d'estimation (Lloyd, 2010; Ahrens, 2006 ; Prise et *al.* 2000). Les Systèmes d'information géographique (SIG), la géostatistique fournissent des explications spatiales rationnelles du phénomène étudié.

L'une des principales préoccupations des chercheurs est de fournir aux décideurs des outils pour mieux adapter les futures stratégies de développement durable et de gestion des ressources naturelles. L'importance de l'analyse de quelques paramètres climatiques dans différentes parties de l'Algérie a été abordée dans des études antérieures. Ces paramètres climatiques ont été élaborés sans tenir compte de leurs tendances, du climat de la région ou d'autres facteurs influençant les variables climatiques, sauf pour quelques études récentes dans lesquelles la caractérisation des facteurs climatiques a été bien abordée (Meddi and Toumi, 2015 ; Ouallouche and Ameer, 2014 ; Benabdesselam and Amarchi, 2013 ; Smadhi and Zella, 2012).

Dans notre objectif d'étude, nous avons estimé intéressant et utile de se focaliser davantage sur deux paramètres climatiques à savoir la pluie et les températures basses (les gelées). Une étude a donc été entreprise afin de définir le gradient ainsi que les facteurs qui influent sur la variation spatiale des précipitations. Dans cette étude, la cartographie de répartition spatiotemporelle des gelées ainsi que l'impact sur les céréales est considérée dans cette étude. Ainsi, la cartographie des gelées servira à la détermination des zones adéquates et moins vulnérables à la mise en place des cultures de blés aux moments des grands froids. En d'autres termes, l'étude se base sur des enregistrements chronologiques des précipitations et des gelées sur l'échelle annuelle et mensuelle. Ces données et les cartes fourniraient des informations sur le comportement de ces facteurs climatiques. Par ailleurs, dans cette thèse,

nous tenterons de déterminer les périodes qui coïncident avec les phases les plus sensibles au stress hydrique ou thermique. La zone d'étude qui englobe 33 610 km² est considéré historiquement comme potentiellement céréalière et de ce fait, elle est choisi pour son potentiel agronomique et son importance stratégique dans le développement économique du pays. Pour faire face à la complexité de traitement de l'information, nous avons opté à la combinaison de l'approche géostatistique avec les SIG pour la cartographie numérique des gelées. Pour mieux estimer les précipitations au plan spatio-temporel et de déterminer la structure du gradient pluviométrique dans la zone d'étude, une méthode a été développée qui combine deux approches régression linéaire multiple et géostatistique. Nous avons effectué une analyse thématique des informations physiques grâce aux cartes thématiques obtenues pour définir la répartition adéquate des céréales pluviales dans la zone d'étude. Ainsi, la céréaliculture pluviale sera délimitée au niveau des zones les plus appropriées.

La structuration de cette thèse s'articule autour de trois principales parties à savoir :

-) Le premier chapitre : synthèse bibliographique qui portera sur des rappels théoriques des mécanismes de formation des précipitations, des effets des gelées, de la présentation de quelques caractéristiques du climat méditerranéen et celles des régions semi arides. Il sera souligné une description des approches statistique, géostatistique et de cartographie numérique ;
-) Le deuxième chapitre: matériel et méthodologie traitera la présentation de la zone d'étude, les données climatiques utilisées ainsi que les méthodes et outils utilisés ;
-) Le troisième chapitre : résultats et discussions, se focalisera sur l'interprétation des résultats obtenus et,

Une conclusion générale

Premier Chapitre
Synthèse Bibliographique

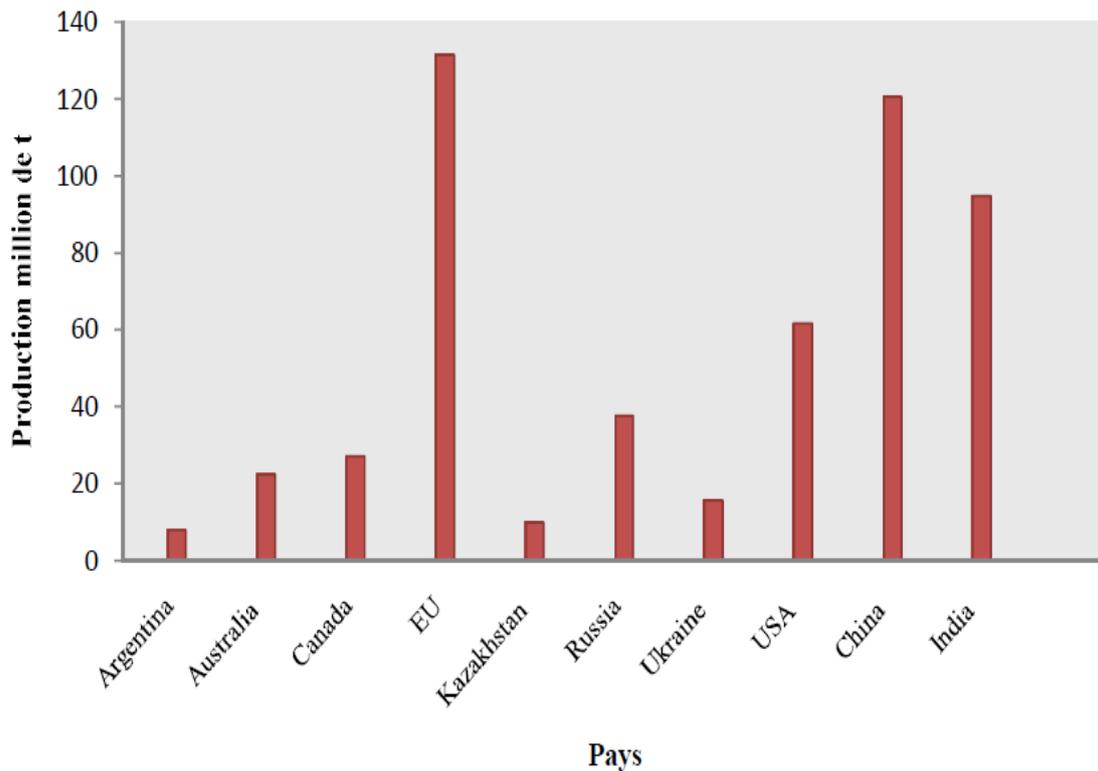
1. Aperçu général sur les céréales

L'épigraphe du blé accompagne l'histoire de l'homme et de l'agriculture (Feillet, 2000). La domestication du blé, liée à la naissance de l'agriculture, est survenue au proche orient. Selon Cook et *al.* (1991), l'origine géographique du blé semble être l'ouest de l'Iran, l'est de l'Irak, et le sud et l'est de la Turquie. Toutes les espèces de blés spontanées et cultivées appartiennent au genre *Triticum* et sont distribuées sur un vaste territoire qui s'étale de l'Asie centrale aux régions du bassin méditerranéen. En Algérie, selon Pictav (1856), le blé dur (*T. durum*) était la seule variété connue de la population autochtone avant la colonisation française.

1.1 Place des céréales et échanges mondiaux

Les céréales occupent une place très importante dans le monde, avec une surface cultivée de près, de 700 millions d'hectares, soit presque 15 % de la surface agricole mondiale. Le blé tendre couvre 92% de la surface mondiale emblavée en blé contrairement au blé dur qui est cultivé seulement sur 20 millions d'hectares (Srivastava, 1984).

La masse monétaire que représentent, les échanges de commerce des céréales dans le marché mondial et les bourses, représente près de 17% (Branlard et *al.* 2012). Les échanges mondiaux de céréales en 2016/2017 sont estimés à 388 millions de tonnes. Ils sont inférieurs de 2% (7,8 millions de tonnes) par rapport à l'année 2015/2016 (FAO, 2016). Selon les estimations, le commerce mondial du blé en 2016/2017 (juillet/juin) dépassera de 0,4% le niveau élevé de la campagne précédente et atteindra un nouveau sommet de 168,5 millions de tonnes, or que les échanges de blés étaient de 650 million de tonnes en 2010 (Branlard et *al.* 2012). Une offre à l'exportation et des prix bas vont stimuler les échanges. L'Australie, la Russie et les États-Unis seraient les principaux bénéficiaires de cette hausse des exportations (FAO, 2015). Les principales régions productrices de blé dur dans le monde, sont représentées sur la figure 1. Concernant la consommation alimentaire de céréales, elle s'établirait en 2020 aux environs de 1 milliard de tonnes (Feillet, 2000), soit 1,2% de plus qu'en 2015/2016 (FAO, 2016). La consommation annuelle mondiale par habitant resterait stable, à près de 149 kg. Le blé devrait se maintenir à 67 kg de blé et le riz autour de 54 kg. La culture des blés est associée en général aux zones semi-arides dont la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 300-400 mm (Srivastava, 1984 ; Daaloul, 1988). Dans les pays méditerranéens, les cultures céréalières représentées par l'orge, le blé, l'avoine et le maïs sont les principales productions agricoles avec plus de 50% des surfaces cultivées (Abeledo et *al.* 2008).



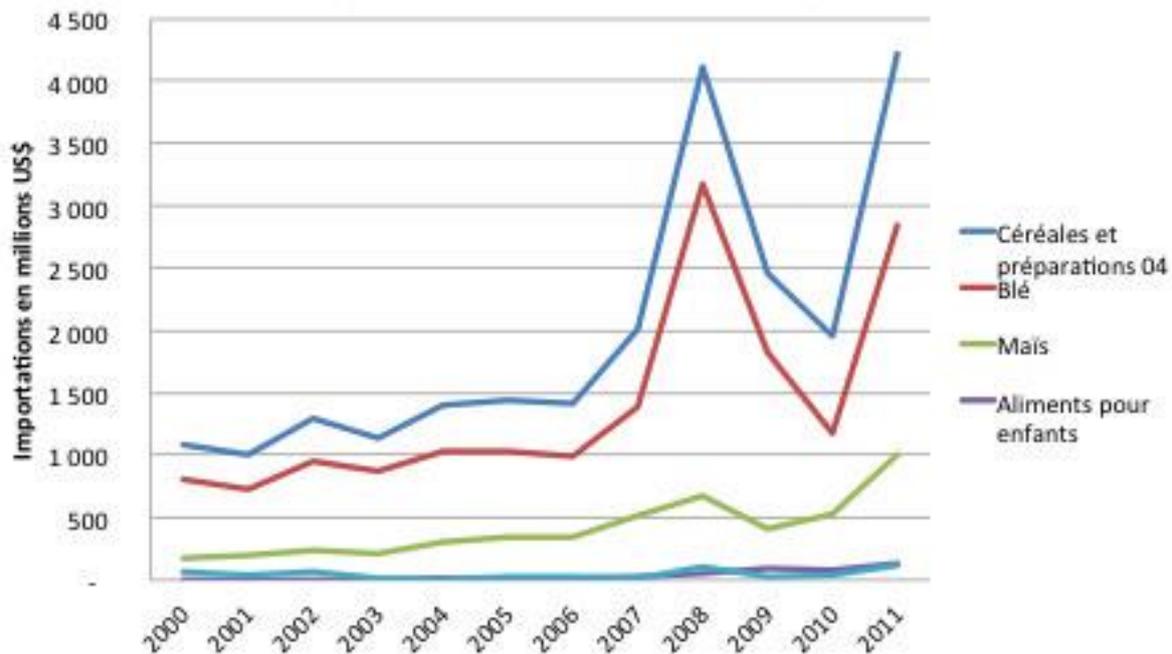
Source : CIC, 2013

Figure 1. Principaux producteurs de blé dur en million de tonnes dans le monde au cours de la campagne céréalière 2012/2013 (CIC, 2013).

1.2. Situation de la filière céréalicultrice en Algérie

Les céréales, socle historique de la diète méditerranéenne, occupent aujourd'hui en Algérie une place prépondérante dans la production agricole, dans l'industrie agroalimentaire et dans la consommation alimentaire des ménages. La consommation moyenne a atteint 231 kg/habitant/an (Rastoin et Benabderrazik 2014). En effet, le blé dur demeure la base de l'alimentation de l'algérien moyen (semoule principalement, et pâtes). Une progression rapide du blé tendre (pain, biscuiterie, pâtisserie), est observée avec l'occidentalisation du modèle de consommation. L'orge et le maïs sont destinés principalement à l'alimentation animale. Les céréales occupent en moyenne, environ 3,6 millions d'ha, soit près de 42,6% des terres arables et presque la même surface consacrée à la jachère (39,6%). Leur mode de culture est pluviale (moins de 3% en irrigué et majoritairement localisée en zone humide et subhumide, dans le nord du pays) (Djermoun, 2009). Les parcelles des cultures céréalières, sont majoritairement de petites tailles. En effet, 717 000 exploitations possèdent des parcelles de moins de 10 ha, soit 70% et 230 000 exploitations ont des surfaces entre 10 et 50 ha, soit 23%. La moitié de la production de céréales en Algérie, selon Rastoin et Benabderrazik (2014), est réalisée par des exploitations de taille modeste (moins de 50 ha). Le rendement moyen mondial des céréales en 2004, est de 29 q/ha (FAO, 2015) alors que le rendement du

blé en Algérie, n'atteint en bonne année que 50% de la moyenne mondiale (Kellou, 2010). Les réformes économiques et agricoles pour booster la production des céréales n'ont pas apporté les résultats escomptés en dépit des technologies apportées pour freiner les importations de céréales (Figure 2). L'écart spectaculaire entre production et consommation des blés a contraint l'Algérie à devenir l'un des plus grands pays importateur des blés dans le monde.



Source : Données FAOstat, 2013

Figure 2. Importations des céréales et de ces dérivés en Algérie

1.3. Zonage agroclimatique

Le zonage agroclimatique est considéré comme un outil pour surmonter les contraintes climatiques représentant un handicap majeur à la gestion de développement agricole, dans les zones semi-arides et arides (Madani., 2008). Ces dernières sont sous la dépendance des variations annuelles de la pluviométrie, mais aussi, sous l'influence d'autres facteurs tels que, l'imprévisibilité des conditions thermiques et radiatives extrêmes dont le système d'information et de mesure reposent sur une couverture spatiale exhaustive. Cette situation conduit à l'absence de connaissances fiables des risques en rapport avec l'évolution des ressources naturelles existantes, dans ces zones. Selon Moron (1996), la difficulté d'établir une bonne analyse agroclimatique en vue d'une finalité de délimitation biogéographique réside dans l'indisponibilité d'une banque de données agroclimatiques complètes offrant une couverture spatiale satisfaisante. Pour Dubé (2005), le potentiel agronomique d'une région

relève à la fois des qualités pédologiques du milieu et des caractéristiques climatiques régionales. Une évolution climatique rapide (un siècle) permettant de supporter des cultures dans une zone à temps 't', ne signifie pas une évolution pédologique aussi rapide car elle est à l'échelle du millénaire. Selon le même auteur, le fonctionnement physiologique harmonieux des plantes dépend d'un équilibre entre la lumière, la température et la disponibilité en eau. Mais, il dépend également, de la quantité et de la distribution des précipitations. Le potentiel agroclimatique qui représente la variation spatiale des facteurs climatiques en particulier les précipitations, ont un impact significatif sur le choix des zones agroclimatiques ou aptitude culturale d'une région. L'évaluation agroclimatique à l'échelle régionale, est une technique de zonage représentant une alternative à la cartographie de variables quantitatives disponibles en chaque point du réseau agroclimatique (Choisnel et Seguin, 1986). Ces variables peuvent être représentées sous forme de croisement de données climatiques, pédologiques et/ou phénologiques.

1.4. Répartition des zones céréalières en Algérie

Les céréales sont cultivées traditionnellement, dans tout le bassin méditerranéen (Ferreira, 2011). Les zones d'adaptation sont distinguées en référence à la pluviométrie (Baldy, 1992).

- 1) Les régions très pluvieuses reçoivent plus de 800 mm/an en moyenne. Dans ces régions, le blé tendre occupe une place dominante comparativement, aux autres céréales d'hiver. Son rendement peut être affecté par des sols engorgés et mal drainés, suite à des excès de pluies en hiver et qui peuvent être faibles au printemps ;
- 2) Les régions pluvieuses qui se situent entre 500 et 750 mm en moyenne. Les années où les pluies de printemps sont satisfaisantes, dans ces régions le blé tendre et dur trouvent leurs places favorables, 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 ;
- 3) Les régions à pluviométrie limitée. Elles sont situées entre 350 et 500 mm en moyenne. Les pluies peuvent devenir inférieures aux besoins en eau des blés en particulier pour le blé tendre. Le choix de techniques et de successions culturales, mais aussi des variétés adaptées, deviennent essentiels. Les blés durs peuvent avoir leur place, mais l'orge est plus adaptée à ces situations ;
- 4) Les zones à faible pluviométrie qui reçoivent moins de 300 mm, 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 ;

5) En dessous de 250 mm, la céréaliculture n'est plus possible sans irrigation.

Les cultures céréalières en Algérie sont pratiquées sur l'ensemble des zones agro-écologiques du territoire avec une prédominance au niveau des zones telliennes et semi-arides, en rapport avec les pratiques culturales qui classent ces cultures en fonction des traditions et du paramètre pluviométrique (Seltzer, 1949 ; Baldy, 1974; Smadhi et Zella, 2012). 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 cycles en corrélation directe avec les principales conditions naturelles (localisation, géomorphologie, altitude, position géographique et sols).

Les limites pluviométriques des zones dites à potentialités céréalières sont comprises entre les isohyètes 350 mm et 600 mm (Baldy, 1974). La localisation géographique et la diversité topographique (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.

2. Les précipitations

Les précipitations sont des phénomènes météorologiques à l'origine des régimes hydrologiques et constituant la matière première des débits des cours d'eau (Roche, 1963). Elles représentent les principales entrées des grands systèmes hydrologiques continentaux qui sont les bassins versants (Valipour, 2016; Sangati et Borga, 2009). Les précipitations représentent, le paramètre climatique qui varie le plus, dans le temps et dans l'espace. Leurs distributions et les quantités reçues, sont liées aux facteurs géographiques telles la longitude,

la latitude, l'altitude, la distance à la mer ; la saisonnalité (Slimani et *al.* 2007) et topographique (Subyani, 2004).

2.1. Genèse des pluies et régimes pluviométriques

Les phénomènes météorologiques s'expliquent par un ensemble de mécanismes physiques entretenant une étroite dépendance à différentes échelles spatiales et temporelles. L'inventaire des phénomènes atmosphériques (précipitant ou non), a conduit Orlanski (1975) à proposer une classification de l'ensemble des processus atmosphériques, en fonction des échelles de temps et d'espaces. Les précipitations peuvent être classées en plusieurs régimes pluviométriques (Domingues Ramos, 2002) :

- les précipitations convectives ;
- les précipitations orographiques et ;
- les précipitations frontales ou cycloniques

Les précipitations convectives se forment suite à l'ascendance de particules d'air humide lors du réchauffement de la surface du sol qui 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 (Kawamura et *al.* 1997). Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale.

Les précipitations orographiques (du grec oros, montagne), ce type de précipitations résulte de la rencontre entre une masse d'air chaude et humide et une barrière topographique particulière. Ce type de précipitations n'est pas « spatialement mobile » et se produit souvent au niveau des massifs montagneux. Les caractéristiques des précipitations orographiques dépendent de l'altitude, de la pente et de son orientation, mais aussi de la distance séparant l'origine de la masse d'air chaud du lieu de soulèvement. En général, elles présentent une intensité et une fréquence assez régulières (Miniscloux et *al.* 2001).

Les précipitations frontales sont associées aux surfaces de contact entre deux masses d'air de température, de gradient thermique vertical, d'humidité et de vitesse de déplacement différents, que l'on nomme « fronts ». Les fronts froids (une masse d'air froide pénètre dans une région chaude) créent des précipitations brèves, peu étendues et intenses. Du fait d'une faible pente du front, les fronts chauds (une masse d'air chaude pénètre dans une région

occupée par une masse d'air plus froide) génèrent des précipitations longues, étendues, mais peu intenses.

2.2 Régimes des précipitations en régions méditerranéennes et en Algérie

Les pluies méditerranéennes sont irrégulières en termes de répartition spatiale, de fréquence et en quantité, certaines zones sont régulièrement arrosées que d'autres, pourtant voisines. Dans les régions méditerranéennes, la mer réchauffée en été combiné au grand réservoir énergétique de la convection d'automne, donne un potentiel pour un enclenchement de perturbation en automne et surtout en hiver. Ce type d'instabilité requiert un mécanisme extérieur pour amorcer le soulèvement. Le plus naturel et le plus efficace est le soulèvement orographique (Banta, 1990). Ces deux conditions (proximité de la mer Méditerranée et présence de relief) donnent souvent naissance à des évènements à la fois de convection profonde et peu profonde. Selon Baldy (1993), on observe une grande similitude entre les répartitions d'un mois (ou trimestre) donné, pour des stations situées dans une même zone climatique et d'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. 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 faibles intensités instantanées 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.

Le nord de l'Algérie est dans la zone tempérée et jouit d'un doux climat méditerranéen. Compte tenu de sa topographie, il existe de forts contrastes dans les températures avec des incidences sur la pluviométrie. Les pluies sont assez abondantes le long de la partie côtière du

Tell, les précipitations augmentent de l'ouest vers l'est. La pluviométrie moyenne annuelle est de 400 mm à l'ouest, 700 mm au centre et 1400 mm à l'est pour le littoral. Les précipitations y sont plus importantes dans la partie nord de l'est de l'Algérie, où elles atteignent jusqu'à 1400 mm/an. Le massif du Djurdjura, situé en Kabylie et le massif de l'Edough, situé plus à l'est, sont les zones les plus arrosées de l'Algérie (Touazi et *al.* 2011). La région des hauts plateaux d'Algérie avec un climat de type méditerranéen reçoit 70% des cumuls pluviométriques, pendant la saison froide d'octobre à février. Dans cette région, les précipitations se raréfient et deviennent plus irrégulières: 250 à 600mm (le plus souvent réparties entre 50 et 70 jours/an). La saison sèche peut se prolonger jusqu'à 5 voire 6 mois (Chenafi et *al.* 2006).

2.3. Facteurs de variation des précipitations

2.3.1. Effet du relief et de l'exposition

Les montagnes agissent sur la circulation atmosphérique dans de large gamme d'échelles, contribuant à une répartition inégale de l'humidité et des pluies dans l'espace et dans le temps. Le relief a un effet important sur le déclenchement et le l'intensité des précipitations. Ce mécanisme de renforcement de la pluie varie selon Barros and Lettenmaier (1993) entre 50 à 85% pour des reliefs peu marqués (collines de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres de hauteur), il atteint plus de 200% pour des reliefs très marqués, supérieurs à 1000 m d'altitude (Barros and Lettenmaier, 1993). Le relief agit comme un catalyseur de la formation de la pluie. Il freine les masses d'air, canalise l'humidité, le vent et la chaleur dans certaines zones et de ce fait, déclenche ou renforce les mécanismes de convection, condensation et précipitations. D'après Miniscloux (2001), le relief favorise également, la convection peu profonde en amenant les particules en instabilité conditionnelle à leur niveau de convection libre.

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 de très grandes variations dans tous les climats arides ou semi-arides. En effet, plus la latitude est élevée, plus l'effet sur les pluies est important (Oki et Musiake, 1991; Choisnel, 1986). En Algérie, les précipitations diminuent du Nord au Sud. Les pluies et la latitude forment une relation proportionnelle, phénomène appelé, effet de la continentalité. Par ailleurs, l'effet de la longitude sur les précipitations varie plus, par rapport à la variation saisonnière du climat. Son effet est lié à changement globaux et à des phénomènes astronomiques influents les précipitations (Barancourt, 1990).

2.3.3. Effets du vent

Des études ont montré que les précipitations sont toujours liées à des convergences cycloniques ou frontales, des convergences de méso-échelle associées à des vents de vallées, de l'instabilité atmosphérique ou de l'humidité (Cosma and *al.* 2002). Là où la vitesse des vents est élevée et si de plus le sol où la végétation est humide en surface, une part importante du rayonnement est utilisée pour l'évaporation et la pluviométrie devient importante. Ce raisonnement s'applique au cas d'un massif montagneux au printemps et au démarrage de la végétation. En Algérie, les vents dominants de l'est et du nord-est en été changent pour l'ouest et le nord en hiver avec un effet sur l'augmentation générale des précipitations de septembre à décembre, une baisse vers la fin de l'hiver et les mois du printemps, et une quasi absence de précipitations durant les mois d'été.

2.3.4. Effets de l'humidité de l'air

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. Ce phénomène se traduit 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 (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.

2.3.5. Effets du végétal

Le couvert végétal joue un rôle très important dans la modification des conditions climatiques. Il agit sur la rugosité qui dépend, surtout, de la hauteur des plantes, de la variation des strates et de son développement. Le couvert végétal agit, aussi, sur l'albédo. Ainsi par l'évaporation dégagée, la biomasse joue un rôle de régulateur de température de l'air, de la teneur du sol en eau et de la quantité de rayonnement solaire pénétrant le sol (Escourrou, 1978).

2.4. Mesure et analyse 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 de la lame d'eau totale précipitée, en mm ($1\text{mm} = 1 \text{ l/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$), sur des durées déterminées (Koteswaram, 1974). Les pluviographes permettent de déterminer le cumul de pluie précipitée au cours du temps, et de déterminer l'intensité de la pluie, en mm/h.

Pour une région donnée, les stations météorologiques forment un réseau d'observations. Elles fournissent des mesures ponctuelles d'une haute importance pour les statistiques climatiques, la planification et la gestion des ressources et les projets. La nature et la densité des réseaux doivent tenir compte du phénomène observé, du but des observations, de la précision désirée. Les stations de mesures météorologiques sont normalement distribuées en fonction d'un certain nombre de paramètres (Bertrand-Krajewski et *al.* 2000). Les stations de mesures météorologiques terrestres ont tendance à être multipliées dans certaines régions d'un intérêt plus important au détriment d'autres régions. Ce sont, d'abord les aéroports et les ports maritimes de trafic international et national, mais également les régions les plus proches de la zone d'où viennent les perturbations. Ils existent aussi, des réseaux de mesures implantés des différents régions pour les besoins très spécifiques à savoir des réseaux de mesures des pluies pour les besoins de l'hydrologie (pluie -/débit) et des réseaux de surveillance et de veille agrométéorologique (Castany, 1963). De manière générale, le cumul pluviométrique est considéré comme une donnée essentielle au point de vue météorologique et climatique (Estienne et Godard, 1970). Ces données sont exploitées et traitées par des utilisateurs dans plusieurs domaines.

2.5. Variabilité spatiale des pluies et densité de points de mesures

La nécessité de prendre en compte la variabilité temporelle et spatiale des données climatiques 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. Pour des régions étendues, 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. 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 de la région à étudier. Dans tous les cas, il faut tenir compte des particularités locales : relief, microclimat, vents dominants, urbanisation (Bertrand-Krajewski *et al.* 2000).

Osborn et Hulme (1997) suggèrent l'utilisation d'environ 15 stations pour obtenir une bonne estimation de la moyenne et de l'écart-type sur un point de grille de modèle à une résolution d'environ 50 km. Au-delà de 15 stations, la moyenne et l'écart-type varient très peu, tandis qu'en deçà, l'incertitude de l'estimation augmente en conséquence. Même avec 15 stations, Osborn et Hulme (1997) trouvent un biais de 10% sur les moyennes spatiales de la variance de la précipitation ainsi, que sur la fréquence d'occurrence des événements de précipitation par rapport aux observations. Toutefois, ce seuil de 15 stations par point de grille est très rarement atteint, même en Europe ou aux États-Unis où les réseaux de stations d'observations sont parmi les plus denses au monde. Choisnel et Seguin (1986) proposent des normes d'installation des stations météorologiques pour une utilisation agricole, une densité d'une station par 10 Km en plaine et autour d'une station par 1 km en zone accidentée.

2.6. Répercussion des précipitations sur les céréales

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. La pluie est indispensable pour la plante et pour la production. Un 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). En effet, les plantes ont des stades critiques vis-à-vis du déficit en eau durant le long de la période de leur développement. Pour les céréales nobles ou primaires, un manque d'eau peut entraîner une baisse de rendement pouvant atteindre 50% (Lafarge, 1986). Tardieu *et al.* (1995) et Boyer, (1985), 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. Cette eau permet aussi la régulation de la transpiration qui est une fonction vitale chez la plante. 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, 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) du fait que l'eau est le constituant pondéral le plus important pour le végétal puisqu'il représente 60 à 80% du poids frais à la plante (Monneveux et Belhassen, 1996). Le

déficit hydrique peut avoir une incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tout au long du cycle (Semcheddine et Hafsi, 2014).

2.7. Réponse des céréales à l'eau par phase phénologique

Bien que la céréale ait des besoins continus en eau, il existe des périodes critiques où elle doit consommer des quantités importantes en eau, car un déficit hydrique survenant au cours de ces périodes, provoquerait des chutes de rendements considérables. La phase levée-tallage est très sensible au stress hydrique. A cette période, les besoins en eau du blé sont de l'ordre de 25 à 30 mm. Une carence hydrique précoce précédant la phase tallage réduit le nombre et la taille des talles chez les céréales (Harris *et al.* 1991). Un stress hydrique à la fin montaison, entraîne une réduction du nombre de grains par épillet (Saeedipour et Moradi, 2011). Selon Chennafi *et al.* (2006), la période la plus critique vis à vis du stress hydrique est comprise entre les 20 jours qui précèdent l'épiaison jusqu'à la fin du palier hydrique. Selon Moule (1980), les besoins en eau du blé deviennent considérables à la montaison et en fin de l'épiaison et peuvent atteindre les 180 mm. Varnet *et al.* (1967) affirment que durant toute la période de l'épiaison, la consommation en eau est maximale. D'après Wardlaw (2002), un déficit hydrique survenu avant la floraison, limite la production de matière sèche et l'accumulation d'azote par la culture et par conséquent peu limiter le nombre de grains par m². Par contre, un excès d'eau pendant la floraison peut se manifester par la coulure (mauvaise fécondation des fleurs) (Bahlouli *et al.* 2008). 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. Le stress hydrique à ce stade limite l'accumulation de biomasse par la culture et provoque une maturation précoce des grains (Kobata *et al.* 1992), diminuant ainsi le poids de mille grains.

3. Température de l'air

La température est une qualité de l'atmosphère et non une grandeur physique mesurable au sens strict du terme (Pèguy, 1970). 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). 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. Les températures varient considérablement autour du bassin méditerranéen, en fonction de l'éloignement de la mer (l'effet de continentalité est très marqué). 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 : approche du réseau temporaire spécifique, approche de la télédétection et approche de la thermographie satellitaire. Selon Roy (2009), les extrêmes, qu'ils soient de nature météorologique ou climatique, sont des événements rares, d'intensité et de durée particulière, physiquement et statistiquement difficiles à cerner, compte tenu d'une part, des rétroactions entre les effets locaux et régionaux et de grande d'échelle, et d'autre part du faible échantillon d'événements. De même, l'analyse de la fréquence d'occurrence de ces événements météorologiques nécessite l'utilisation des informations à haute résolution, à partir des données voire quotidiennes ou sous-quotidiennes.

En Algérie et dans le Tell en particulier, la température moyenne en été se situe entre 21°C et 24°C et chute en hiver vers 10°C à 12°C. Les hivers ne sont pas froids, mais le taux d'humidité est élevé. Dans l'est de l'Algérie, les températures moyennes sont un peu plus basses, et au niveau des steppes des Hauts Plateaux, les températures hivernales sont à quelques degrés au-dessus de zéro. Une caractéristique marquante du climat dans cette région est le sirocco, un vent du sud au large du désert

3.1 Facteurs de variation des températures

Selon Viers et Vigneau (1990), il existe de fortes différences de température d'un point à un autre. Ainsi elles varient en fonction de :

- la latitude : La latitude est un facteur de zonalité ; les températures sont d'autant plus fraîches que l'on se déplace de l'équateur vers les pôles. En général, les températures décroissent au fur et à mesure qu'augmente la latitude, mais la nébulosité y intervient largement. Les valeurs les plus élevées ne se localisent pas dans la zone équatoriale, mais dans les régions tropicales ou subtropicales sèches et à faible nébulosité. Aux moyennes et en hautes latitudes où la température moyenne annuelle est faible, la zonalité est plus troublée par les contrastes saisonniers et les contrastes entre les océans et les continents ;

- la situation continentale ou océanique : C'est un important facteur de zonalité dans la répartition des températures. A latitude égale, l'air situé au-dessus d'un continent peut avoir une température forte différente de celle de l'air au-dessus d'un océan (effet de l'oasis et effet de l'île). En effet, la température des grands océans et les mers est presque constante, alors que les substrats continentaux s'échauffent rapidement et intensément au soleil ;

- la position de la station de mesure : En général, aux moyennes et hautes latitudes en hiver, les parties orientales des océans sont relativement plus chaudes que celles occidentales et c'est l'inverse pour les côtes continentales. Aux basses latitudes, c'est le contraire: ce sont les parties occidentales des océans qui bénéficient de températures hivernales relativement plus clémentes ;

- l'altitude : Sur les cartes de températures, on constate que le tracé des isothermes est souvent étroitement lié à l'altitude. Le gradient de la température (gradient thermique vertical) est d'environ 0,5 à 0,6°C par 100 m. Cette valeur peut se modifier localement assez notablement et les réductions altitudinales des températures minimales et maximales sont souvent différentes (Baldy et Elamami, 1965) ;

- la topographie : L'exposition joue un rôle capital dans la distribution des températures. Les versants exposés au nord, sont des versants froids et boisés, au contraire des versants exposés au sud qui sont des versants ensoleillés et cultivés. D'autres phénomènes, observés en montagne, sont dus à la topographie comme : l'inversion thermique, c'est-à-dire que la température, au lieu de décroître avec l'altitude, elle augmente. Où encore, la température qui augmente avec l'altitude mais rediminue rapidement à partir d'une certaine limite altitudinale qui varie selon le contexte climatique général.

- Du sol : L'albédo du sol dépend de la teneur du sol en eau et de sa couleur. Plus le sol est blanc, plus il réfléchit la radiation directe qu'il rediffuse. Plus il est noir, plus il absorbe la chaleur. L'influence du sol sur les températures de l'air dépend de sa conduction thermique et de celle du sol. Si celle-ci est bonne, la chaleur pénètre à l'intérieur et les variations en surface sont faibles. Un sol froid, comme l'argile, se réchauffe et se refroidit lentement, il conserve une haute température, la nuit. Le gel y est moins fréquent. Les sols les moins poreux sont les meilleurs conducteurs thermiques (Escourrou, 1978).

3.2. Effet des basses températures sur les céréales

La somme des températures moyennes aux cours du cycle végétatif complet des céréales est comprise entre 2000 et 2500 C° (Zouaoui et Bensaid, 2007). Cependant, les températures basses ou élevées peuvent borner leur aire de répartition. Dans certains milieux, les plantes sont soumises, occasionnellement, ou régulièrement de façon saisonnière, à des températures basses. La plupart d'entre elles sont capables de résister aux températures basses. Les céréales d'hiver peuvent survivre à des températures de -25 °C (Körner, 1995). Néanmoins, beaucoup de céréales des régions tempérées peuvent être endommagées à partir de 0°C. Selon Baldy et Stigter (1993), les amplitudes thermiques sont considérablement réduites à la base des couverts végétaux. La variation des températures moyennes est plus

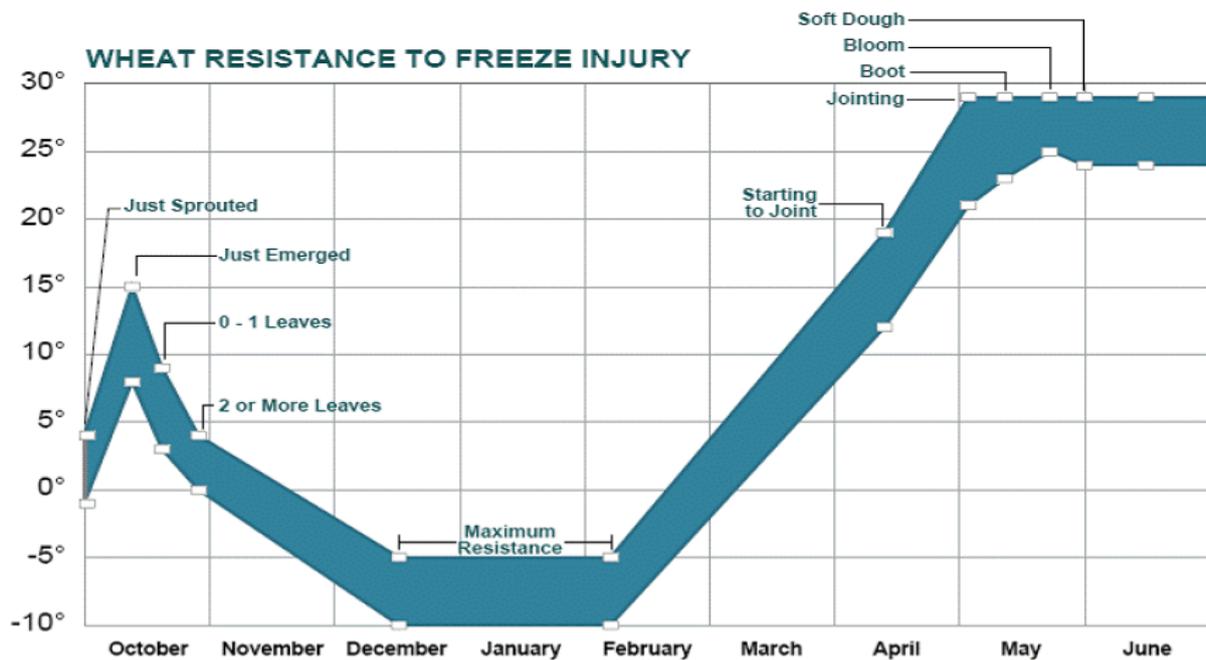
lente au cours du temps sous les couverts qu'à l'air libre. Slafer et Rawson (1994) ont étudié la sensibilité des blés vis-à-vis des facteurs majeurs de l'environnement. Le tableau 1, représente la grandeur des effets des basses températures sur les blés, pour l'estimation, une échelle arbitraire est utilisée: forts (+++++), modérés (++++) ou faibles (+).

Tableau 1 : Réponse des stades phénologiques à la température

Stades phénologiques	Semis-levée	Levée-deux feuilles	Deux feuilles-epis 1 cm	Epis 1 cm-épiaison	Epiaison-pleine floraison	pleine floraison-maturité
Température	+++++/+++++	+++ /++++	+ /+++	+++ /++++	+++ /+++++	+++ /+++++

Source : Slafer et Rawson (1994)

La zone semi-aride des hautes plaines céréalières se distingue par la présence de plusieurs contraintes abiotiques. Leurs effets sur le rendement en grain et ses composantes sont différemment ressentis selon les conditions climatiques de l'année (Makhlouf *et al.* 2012). Dans ces régions, l'action de la température sur la croissance du végétal est spécifique car la gelée constitue l'un des principaux facteurs limitant la croissance des céréales d'hiver. Dans ces conditions les variétés, les plus tolérantes auront les meilleurs rendements. La tolérance au gel peut être définie comme la capacité des plantes à survivre aux températures de congélation, éviter d'endommager les tissus végétatifs et de minimiser d'autres effets négatifs des températures glaciales sur le futur potentiel de rendement (Reinheimer *et al.* 2004). La plupart des blés cultivés ont une résistance limitée au froid, mais les parties endommagées sont généralement remplacées par des talles plus tardives, et l'inconvénient majeur sera un retard du développement de certains cultivars (Baldy, 1993). Par ailleurs, l'une des conséquences des basses températures au cours du printemps est le ralentissement de la croissance (Duru, 1986). 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. 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). La figure 03 présente les températures qui causent des dommages par les gelées aux blés d'hivers à différents stades de croissance. Le blé d'hiver perd rapidement sa rusticité durant la croissance printanière et il est facilement affecté par des gels tardifs.



source : Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service 1995

Figure 3. Températures causant des dommages par les gels climatiques à différents stades de croissance des blés

Un accident par gel printanier survient lorsque les températures basses coïncident avec les stades sensibles de la croissance des plantes. Les accidents peuvent couvrir de vastes superficies ou seulement quelques champs ou parties de champs. Il est le plus sévère le long des rivières, des vallées et des dépressions dans les champs où l'air froid s'installe. Le risque de dommages dus au gel printanier est plus grand lorsque les blés sont semés précoces. Si un gel se produit, le blé a plus de chance d'être endommagé parce qu'il est plus avancé. Le tableau 02 montre les différents symptômes et les dégâts causés par les gelées.

Tableau 02. Symptômes et dommages causés par gel aux stades de croissance printanière des blés

Phase de développement	Symptômes	Impact sur les Rendements
Tallage	Chlorose des feuilles; brûlure des extrémités des feuilles; odeur d'ensilage;	Léger à modéré
montaison	Mort de l'épi; jaunissement des feuilles ou brûlure; lésions, cassure ou flexion de la tige;	Modéré à sévère
Gonflement	Stérilité de l'épi; pointe emprisonnée dans la botte; des dommages à la tige; décoloration des feuilles	Modéré à sévère
Epiaison	Stérilité de l'épi; des barbes blanches ou des pointes blanches; des dommages à la tige; décoloration des feuilles	Sévère
Floraison	Stérilité de l'épi; des barbes blanches ou des pointes blanches; des dommages à la tige; décoloration des feuilles	sévère
Laiteux	Arêtes blanches ou pointes blanches; des dommages aux tiges; décoloration des feuilles; grains rétrécis, rugueux ou décolorés	Modéré à sévère
Pâteux	Grains ratatinés et décolorés; mauvaise germination	Léger à modéré

4. Approche statistique

La science du climat s'appuie sur des méthodes d'analyse de la distribution statistique de variables météorologiques d'une région donnée, sur une période donnée. Cette approche statistique permet de s'affranchir des variations interannuelles du climat, parfois considérables (Arnaud M et Emery, 2000). L'étude du climat et de ses variations sont basées sur un grand nombre d'outils et de concepts statistiques. Ceci se reflète dans le langage employé par les différents rapports du GIEC (Groupe International d'Experts sur le Climat), qui mettent largement l'accent sur les incertitudes et leurs quantifications. Le choix d'une méthode d'analyse statistique bien adaptée à une situation donnée, d'une variable aléatoire est d'autant plus important que les logiciels statistiques actuels offrent à leurs utilisateurs des solutions et des options toujours plus nombreuses et plus diversifiées, du moment où le développement des ordinateurs a contribué à l'essor de la modélisation climatique dès les années 1960 (Dagnelie, 2011).

Les méthodes statistiques et techniques établies qui permettent de vérifier, d'homogénéiser les observations sont nombreuses. Parmi les éléments statistiques les plus utilisés, nous citons, les statistiques élémentaires (Dagnelie, 1973) qui demeurent indispensables pour le traitement des données climatiques. 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.

4.1. Statistiques élémentaires descriptives

La statistique descriptive est la phase qui se limite à décrire et à analyser une population donnée, sans tirer de conclusion (Lazar et Schawartz., 1997). L'étude d'une série temporelle numérisée, présuppose une analyse descriptive détaillée qui met en évidence les principales caractéristiques et propriétés de l'échantillon. Il est fondamental de représenter les données de façon à analyser les trajectoires du processus sous-jacent. Ceci permet une première indication des distributions statistiques uni-variées et des statistiques de base caractérisant, la série. Ensuite, il est utile de connaître la forme et la distribution de cette série (Mouchiroud, 2002). Les méthodes statistiques sont conçues pour contribuer aux scientifiques à évaluer l'incertitude et la variation (Walpole et *al.* 2007). Généralement, les chercheurs utilisent pour décrire les phénomènes climatiques, des indicateurs de positions tels que les valeurs minimum, maximum, moyennes, la somme, le mode et la médiane, ainsi, que les indicateurs de dispersion à savoir la variance, l'écart type et le coefficient de variation.

4.2. Méthodes de comblement des lacunes dans les séries climatiques

Ces méthodes basées sur des approches statistiques, permettent de combler les lacunes dans les séries recueillies, et d'écartier les stations qui présentent une hétérogénéité élevée d'observations. Le choix d'une méthode d'analyse pour étudier un phénomène météorologique, dépend des données même et de la finalité ou le but à atteindre dans l'étude. Les principes de ces méthodes, sont disponibles dans la littérature statistique et dans les publications consacrées à ce sujet. Parmi de nombreuses études, on peut se référer essentiellement à Walpole et al, (2007) ; Bulmer (1979) et Rosenberg (1969) pour résumer les méthodes utilisées pour analyser les données climatiques et environnementales. La méthode de Rosenberg (1969), a été utilisée 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. 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. L'équation s'écrit comme suivant :

$$P = (a \times H) + (b \times D) + (c \times L) + (d \times l) + e^s \quad (1)$$

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

Méthode des rapports. : Selon Bulmer (1979) 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;

$$Pa = Pb \times \frac{Na}{Nb} \quad (2)$$

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 linéaire 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. 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 (Walpole et al, 2007) ;

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 de la valeur manquante se fait en tenant compte des valeurs suivantes et précédentes de la valeur manquante par interpolation (Walpole et al, 2007).

4.3. Fonction de corrélation

Des études basées sur la modélisation mathématique (régression multiple, interpolations, etc.) ont été menées pour établir des corrélations entre les paramètres climatiques et les facteurs du milieu. Cette approche représente une alternative pour conforter les estimations que fourniraient les données, de stations météorologiques disponibles (Marks et al. 2013 ; Vavrus et al. 2006 ; Lloyd, 2005 ; Naoum et Tsanis, 2004; Brunsdon et al. 2001; Goovaerts, 2000 ; Johnson et Hanson, 1995 ; Hevesi et al. 1992). Delhomme (1976), souligne que plus la décroissance de la fonction de corrélation, est rapide, plus la variabilité spatiale de la pluviométrie est importante. Dans ce contexte, il est préférable d'adopter une vision plus globale, en utilisant la notion de fonction de corrélation sous certaines hypothèses de stationnarité du champ. Dans ce cas, le coefficient de corrélation entre les points, ne dépend que du vecteur les reliant et mais leurs emplacements.

4.4. Régression linéaire multiple

Il arrive souvent qu'on explique la variation d'une variable dépendante par l'action de plusieurs variables explicatives, lorsque la relation entre ces variables est linéaire.

La régression linéaire multiple (RLM) est une méthode mathématique modelant le rapport linéaire direct entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables

indépendantes (Sheather, 2009 ; Walpole et *al.* 2007). Elle a été largement répandue dans l'évaluation des variables climatiques (Cook et *al.* 1994). Dans les régions où les facteurs du climat sont sensiblement corrélés avec la topographie (Hay et *al.* 1998), les variables indépendantes incluent généralement, la position et l'altitude des stations. Les régressions multiples sont également, utilisées et appliquées pour analyser et d'expliquer les précipitations orographiques (Naoum and Tsanis, 2004) en tenant compte des variables topographiques. 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 (Bachir et al, 2016) ;
- Juger de l'importance relative de plusieurs variables explicatives sur une variable dépendante en lien avec une théorie causale sous-jacente à la recherche.

4.5. Spatialisation et méthode d'estimation des données climatiques

La régionalisation agro climatique peut être analysée et décrite sur la base de méthodes statistiques. Selon Allard et *al.* (2002) ; Antil et *al.* (2005) ; Goodale et *al.* (1998), le choix d'une méthode de spatialisation des différents facteurs du climat, en particulier les précipitations dépend de plusieurs considérations notamment : - l'objectif à atteindre ; - la nature de la région d'étude et ; - le temps et les ressources disponibles. Une méthode directe ou par ajustement simple de la surface sera suffisante, si l'objectif est d'obtenir une estimation sommaire de la valeur moyenne ou encore, si les ressources sont limitées. L'efficacité réelle de ces méthodes repose sur la densité adéquate de mesures ponctuelles de la variable climatique. Cependant, si le réseau ne couvre pas l'ensemble de l'espace à étudier, des méthodes d'interpolations spatiales plus complexes d'ajustement sont préférables et nécessaire pour une estimation robuste. Lloyd (2010) ; Ahrens (2006); Prise et *al.* (2000), rapportent que les précipitations peuvent être estimées dans l'espace grâce à des méthodes d'interpolation basées sur des modèles mathématiques simples, tels les modèles basés sur les polygones de Thiessen, l'inverse distance pondérale, l'analyse de la tendance extérieure, ou par le recours à des méthodes plus complexes se basant sur le krigeage (Skirvin et *al.* 2000). Par ailleurs, 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 (Meehl et *al.* 2000; Courault et Ruget, 2001).

Dans ce cas, les méthodes d'estimation de géostatistiques comme le krigeage simple ou ordinaire, peuvent être utilisés (Arnaud et Emery, 2000). A l'inverse, les extrêmes de températures sont à la fois conditionnés par les forçages à grande échelle, à savoir les caractéristiques de la circulation synoptique (cyclone/anticyclone, blocage ou intensification de circulation à grande échelle, etc.) et les facteurs locaux, à titre d'exemple, un changement dans les conditions de surface (terre ou masse d'eau) et/ou la présence de relief (Goodale et *al.* 1998 ; Vavrus et *al.* 2006). Le krigeage à dérive externe, a été développé afin de prendre en compte ces facteurs en considération et les travaux d'Allard et al (2002), ont montré l'intérêt de cette méthode qui améliore la précision des estimations des températures avec un gain sur la variance de 10 à 45% suivant les journées.

5. Bases conceptuelles de la géostatistique

La géostatistique est utilisée pour étudier les phénomènes naturels qui se déploient dans l'espace, appelés phénomènes régionalisés. Une variable régionalisée est une grandeur définie sur un domaine de l'espace (Matheron, 1965). Il peut s'agir d'espace à 1, 2 ou 3 dimensions ou du temps. Ashiq et *al.* (2010); Skirvin et *al.* (2003); Goovaerts (2000) rapportent que les méthodes d'interpolation géostatistiques sont basées sur la structure de la continuité spatiale d'une variable (variable avec un caractère régionalisé aléatoire). L'approche géostatistique fournit un ensemble de méthodes statistiques qui décrivent une autocorrélation spatiale des données observées (Slimani et *al.* 2007; Kyriakidis and Journel, 1999; Lam, 1983). L'analyse de la dépendance des observations par la géostatistique, permet l'extension des techniques développées typiquement, dans le seul contexte d'inclure, le temps ou l'espace comme une dimension additionnelle (Kyriakidis et Journel, 1999). La géostatistique est également, utilisée pour spatialiser et cartographier les points de données estimés à partir des valeurs ciblées dans les lieux non échantillonnés (absence de points de mesure) (Piccini et *al.* 2012).

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

- d'estimation de la valeur d'une variable 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.

5.1. Fonction aléatoire

D'après Boulanger (1990) et Chilès (1995), 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 :

$$Z(X) = Z(X, W_o) \quad (3)$$

Il s'agit 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 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 de stationnarité suppose 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.

5.2. 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 (Delhomme, 1976). Dans le cas d'un phénomène isotrope, la fonction de structure dépendra seulement du module de cette inter-distance. 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 $Z(X_j)$, observations ou mesures 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 :

$$S^2 = \{Z(X_i) - Z_m\}^2 - \{Z(X_j) - Z_m\}^2 = \frac{1}{2} \{Z(X_i) - Z(X_j)\}^2 \quad (4)$$

Exprimé également par :

$$S^2(h) = \frac{1}{2m} \sum_i^m \{Z(X_i) - Z(X_i + h)\}^2 \quad (5)$$

Avec h = distance séparant X_i et X_j

et m est le nombre de couples

5.2.1. Variogramme et caractéristique

Un variogramme se caractérise selon la figure 4, par : - Un effet de pépite (Nugget Effect) qui représente le comportement à l'origine du variogramme ou le comportement aux très courtes distances. Il 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 des calculs ; - La portée (Range) représente la distance entre deux observations qui n'ont aucune ressemblance en moyenne, autrement dit, elles ne sont plus liées linéairement et le variogramme atteint un plateau ; - Le palier (Sill) renseigne sur les plus grands écarts en moyenne qui se présentent entre variables aléatoires.

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

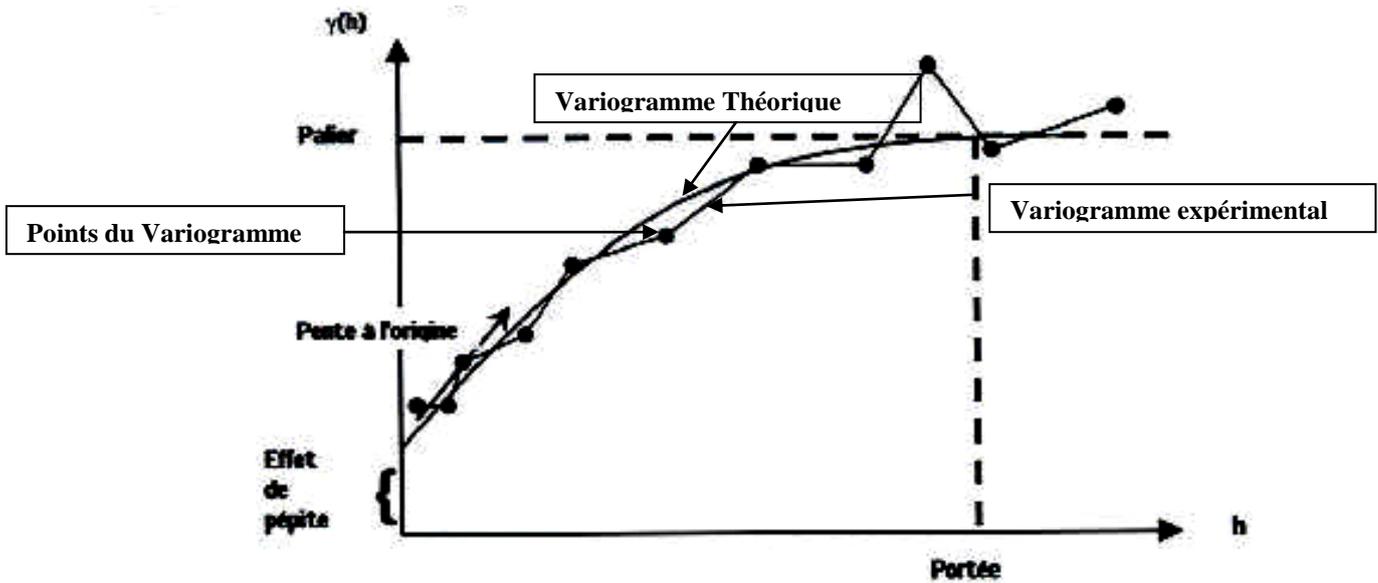


Figure 4. Ajustement d'un variogramme expérimental à un variogramme théorique

5.2.2. Ajustement variographique

Selon Arnaud et Emery (2000), l'étape d'ajustement est l'étape la plus délicate de l'interpolation spatiale. En effet, un modèle d'ajustement non approprié implique une mauvaise interpolation. Cette étape nécessite donc la sélection d'un variogramme théorique qui est une expression analytique que nous tenterons d'ajuster le mieux possible aux points du variogramme expérimental répondant le mieux au problème étudié.

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

- La somme de ces écarts est proche de 0 ;
- La somme des écarts normalisés est proche de 0 ;
- La variance des écarts normalisés est égale à 1.

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

- Le nombre de paires de données intervenant dans le calcul des points du variogramme expérimental soit élevé ;
- Accorder plus de poids aux premiers couples de 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.

5.2.3. Notion de dérive

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

$$E\{ Z(\mathbf{X} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{X}) \} = 0 \quad (6)$$

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 $E(Z)$ est supposé être une fonction aléatoire. Vérifiant l'hypothèse intrinsèque, $M(\mathbf{X})$ représente la dérive déterministe, définie telle que : $E(Z(\mathbf{X})) = M(\mathbf{X})$.

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

$$\begin{aligned} 2 \gamma(\mathbf{h}) &= E\{ Z(\mathbf{X} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{X}) \}^2 \\ &= E\{ Z(\mathbf{X} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{X}) \}^2 - E\{ Z(\mathbf{X} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{X}) \}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$D'où \gamma_{réel}(\mathbf{h}) = \gamma_{est}(\mathbf{h}) - \frac{1}{2} (M(\mathbf{X} + \mathbf{h}) - M(\mathbf{X}))^2 \quad (8)$$

5.3. Krigeage

Dans sa conception la plus générale, le krigeage est 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 $Z(\mathbf{X})$ 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. Celui-ci tend à ramener l'estimateur autour de la moyenne globale. 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 (Vargas-Guzman et *al.* 2000).

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

$$Z(\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^K \lambda_i \times (X_i) \quad (9)$$

Il doit être :

$$\text{Sans biais } E\{ \hat{Z}(\mathbf{B}) - Z(\mathbf{B}) \} = 0 \quad (10)$$

$$\text{Et optimal } V\{ \hat{Z}(\mathbf{B}) - Z(\mathbf{B}) \} = 0 \text{ minimum} \quad (11)$$

Avec :

$\hat{Z}(\mathbf{B})$: L'estimateur de la moyenne de Z sur B,

$Z(X_i)$: la valeur connue de Z en un point X_i ,

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

λ_i : les coefficients de pondération.

6. Systèmes d'information géographique (S.I.G)

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). Un SIG 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). 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. Les SIG peuvent servir la géostatistique et contribuer par le géo-référencement des données, pour une meilleure explication spatiale du phénomène étudié (Bachir et *al.* 2016). 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). Cependant, il est à signaler que 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).

6.1. 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. 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 topographiques, 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). 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).

Deuxième Chapitre

Matériel et Méthodes

1. Région d'étude

La région d'étude est localisée entre 4,2° et 8,3° de latitude Nord et entre 35,00° et 36,6° de longitude Est, des hauts plateaux algérien, à bioclimat en majorité, semi-aride. Elle occupe une superficie globale de 33 610 Km² avec un périmètre de 1 872 kilomètres.

Administrativement, la région d'étude est découpée actuellement, en neuf wilayas: Bordj Bou Arreridj, Sétif, Bejaia, Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Khenchela, Tébessa et Batna. Le choix et la délimitation de la région suscitée, reposent essentiellement sur l'importance particulière que présentent les grandes cultures, notamment, le blé dur en termes de superficies et en termes de productions par rapport à la production nationale (Figure 09).

1.1. Morphologie du relief et limites naturelles

La région d'étude, fait partie de l'orogène alpin qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale. Il est séparé de la plateforme africaine par l'accident sud-atlasique. Le relief offre des horizons beaucoup plus ouverts, la couverture sédimentaire, moins épaisse et plus discontinue (Chennafi et al 2006). La figure 5 résume les différentes unités géomorphologiques de l'Algérie selon un transect Nord Sud

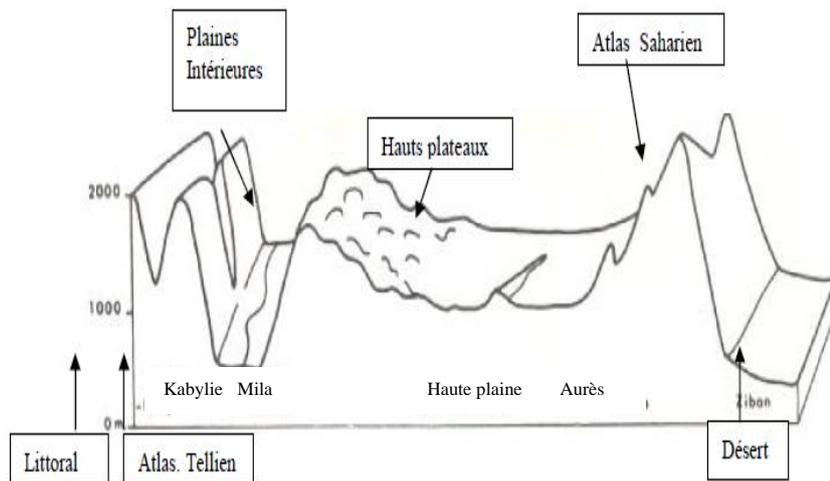


Figure 5. Unités Morphologiques de la région d'étude

Nous avons essayé de décrire les structures de paysages permettant d'expliquer en partie la morphologie du relief dans la région d'étude à travers la réalisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur la base de cartes topographiques digitalisées à l'échelle 1/200 000 (figure 6).

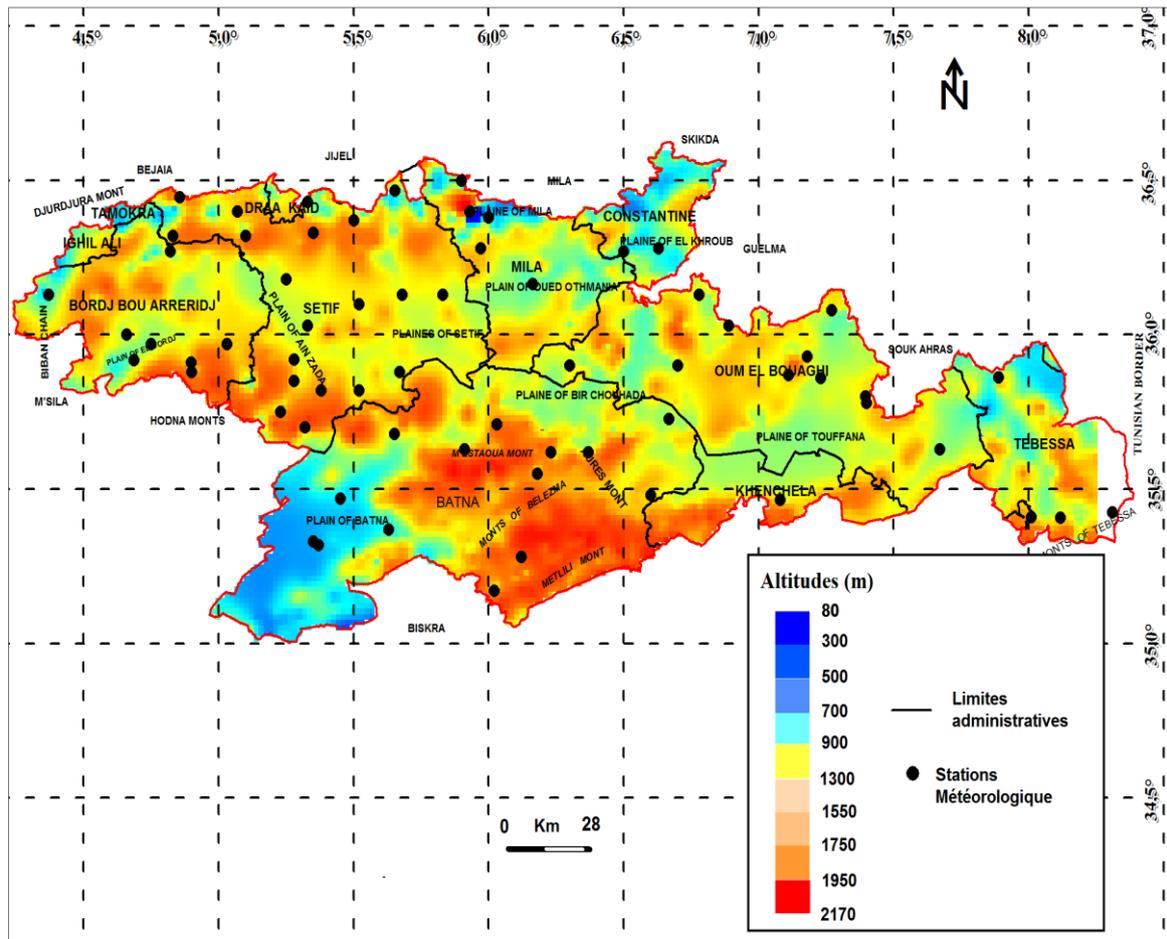


Figure 6. Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région d'étude.

La carte de base MNT, nous a permis de faire ressortir les caractéristiques morphologiques :

Les chaînes de montagnes et forêts qui limitent naturellement la région d'étude. Ces chaînes se répartissent comme suit :

- Au Nord, la chaîne de l'atlas inclut les montagnes de Constantine avec un point culminant de 1 285 m et les monts de Sidi-Dris avec un point culminant de 1 363 m,
- Au Nord-Ouest, la chaîne de Djurdjura dont le point culminant atteint, 2 308 m (Lala Khedîdja),
- A l'ouest la chaîne des Bibans, d'orientation Sud Ouest – Nord Est avec des altitudes relativement élevées à Takoucht (1 900 m) et Megress (1 737 m). Le point culminant caractérise Djebel Babor, avec une altitude de 2 000 m,
- A l'Est les monts de Tébessa (Djebel Doukhane, 2 300 m, et Djebel Bou Roumane, 2 250 m) et la frontière tunisienne.
- Au Sud, les Aurès (Djebel Mahmal) et Djebel Zellatou, (1549 m).

La forêt couvre 16,46% de la superficie des Hauts Plateaux Est .Ce potentiel forestier est menacé par la dégradation (désertification, érosion), notamment dans les Aurès et les Némemchas.

Les plaines de la région d'étude, correspondent aux terrains de Bordj Bou Arreridj, de Sétif et s'étendent jusqu'à Mila, Oued El Othmania et El Khroub à Constantine. Par ailleurs, d'autres plaines occupent la région, elles correspondent à la plaine de Mila, au Nord et les plaines de Touffana et de Batna, au Sud. Ces plaines représentent la majeure partie des terres céréalières (Bahlouli et al, 2008).

Les zones humides dans les Hauts Plateaux Est, sont représentées par un chapelet de sebkhas et de chotts plus ou moins contigus parmi lesquels, nous énumérons: Sebket Tarf, Guellif, Ank Djeniel, Tincilt, Zmoul, Djendli, Bazer, El Homiet, Chott Gardaine, Beida, El Frain. Ces sebkhas sont tributaires des crues des Aurès, et des Monts du Hodna. Les sebkhas constituent un maillon important dans la chaîne de la biodiversité, menacées par la salinisation et l'assèchement.

1.2. Ressources hydriques

1.2.1. Ressources en eaux superficielles

- Les cours d'eaux

La région d'étude, est constituée par un ensemble de bassins et sous bassins versants, traversés par un chevelu hydrographique dense (Figure 08). L'alimentation principale en eau des cours d'eau, est assurée par les oueds principaux issus des reliefs élevés, qui entourent la région. Il s'agit des Djebel Lakhdar, Djebel Babor, Djebel Takoucht et Djebel Errakas. En été, les débits des cours d'eau, diminuent ou deviennent nuls dans certains cas, l'alimentation est assurée par les débits d'étiage à cette époque de l'année. La région est parcourue par une multitude d'oueds. Elle est drainée au centre par l'Oued Ras El Ma et Oued Malah, avec une direction NE-SW. L'Oued Rhumel est le plus important cours d'eau du Constantinois. Il prend sa source dans les monts de Ferdjoua (Mila), pénètre les plateaux de Constantine où son tracé, décrit une série de sinuosités, puis se resserre très sensiblement et forme alors une boucle presque fermée, en conservant une direction générale Sud Ouest- Nord Est. Le Rhumel termine sa course en se jetant dans la mer à l'ouest du golf de Jijel. Les retenues d'eaux (barrage et retenues colinéaires) existantes sont en nombre insuffisant pour satisfaire la demande en irrigation des cultures en place dans la région sauf quelques wilayas qui disposent de volumes intéressants. Ainsi, à titre d'exemple, la wilaya de Batna dispose d'un barrage qui peut effectuer des lâchées d'eau de 3 millions de m³ ainsi que celle de Mila qui jouit du barrage de Beni Haroun, avec une capacité totale de 997,9 millions de m³. Ce dernier, alimente en eau potable

plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment celles de Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna et Khenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour les exploitations agricoles de la wilaya de Mila. Kiouss *et al.* (2010) rapportent qu'en général les retenues collinaires dans la région sont souvent très peu exploitées notamment pour des considérations matérielles liées aux moyens d'amener d'eau, de pompage et d'électrification insuffisants et celles organisationnelles manifestées par l'absence d'une profession organisée (association d'irrigants), condition indispensable pour l'exploitation des retenues collinaires.

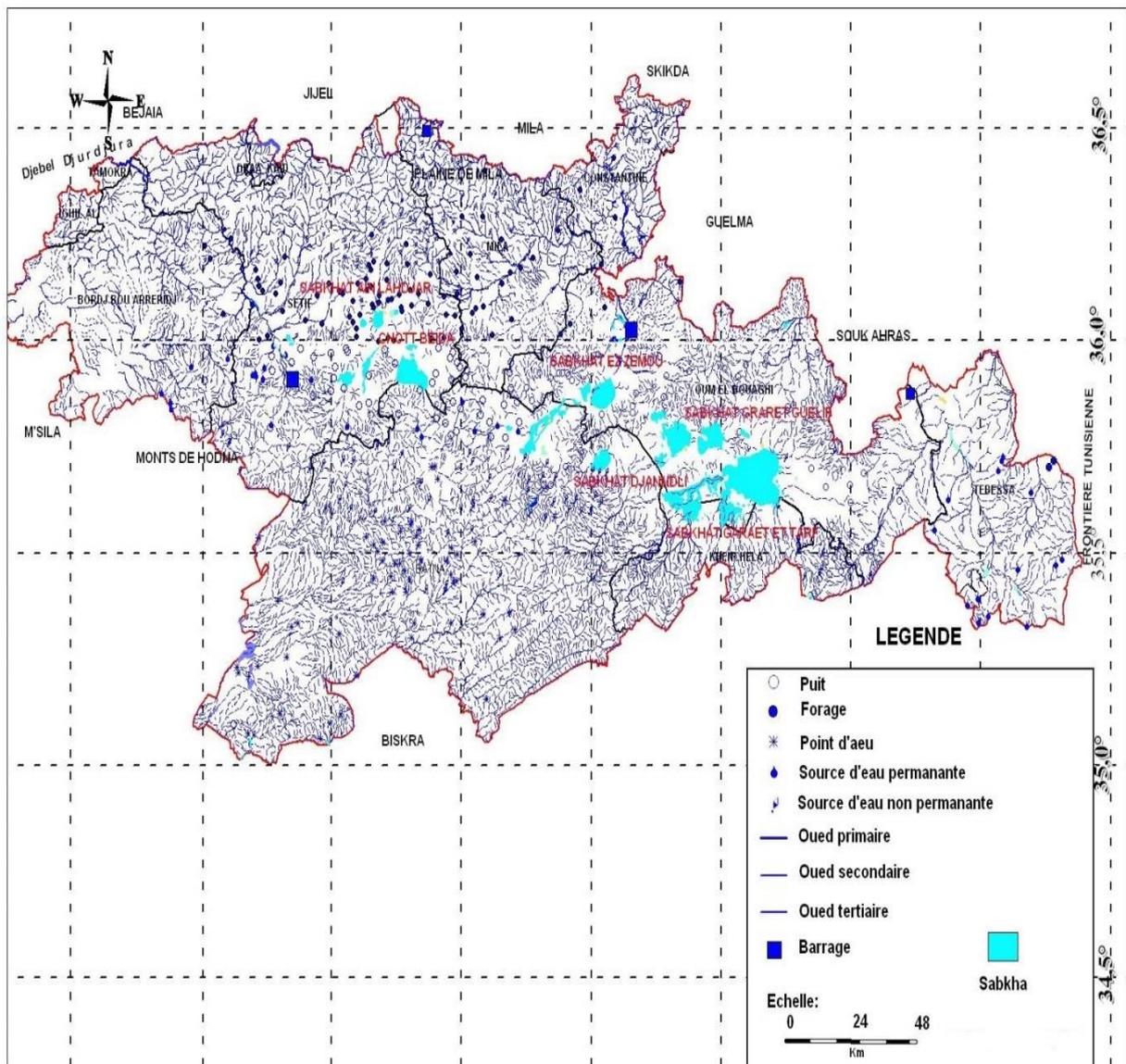


Figure 7. Carte de la répartition du chevelu hydrographique et des points d'eaux

1.2.2. Ressources en eaux souterraines

L'aquifère du Quaternaire: l'aquifère quaternaire est le principal réservoir hydrogéologique de la région. Il est caractérisé par un toit dont la profondeur varie de 0 à 70 m, un mur qui peut atteindre 400 m. Il est formé par des éboulis à blocs, alluvions récentes, glacis polygéniques et croûtes calcaires, admet à sa base des argiles siliceuses beiges et rouges ;

L'aquifère du Miocène : il se distingue par une profondeur qui varie de 0 à 40 m, d'une épaisseur pouvant atteindre 240 m par endroit. L'eau circule dans les grès blancs grossiers, les marnes biomicrites et biomicroparites et grés blanc du Langhien-Serravalien. L'épaisseur de cette aquifère varie de 100 à 200m;

L'aquifère du Crétacé : La formation du Crétacé est marquée par un toit formé de marnes grises à gris bleuté pouvant atteindre 75 m de profondeur alors que le substratum imperméable de nature argileuse à argile siliceuse rouge se situe entre 50 m et 170 m de profondeur. L'épaisseur de cette formation varie entre 45 et à 165 m. L'aquifère est représenté par des formations semi-perméables constituées essentiellement par des marnes et calcaires crayeux, marnes grises bleues, marno-calcaires et calcaires.

Par ailleurs, la qualité chimique des eaux souterraines utilisées en irrigation révèle la présence d'une salinité. Ces eaux influent directement sur le rendement des terres agricoles. A cet effet et étant donné que la zone d'étude est à vocation agricole et est destinée essentiellement à la monoculture céréalière, une étude chimique des eaux d'irrigation est indispensable pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques pour les plantes et les sols (Dekhil, 1991).

1.2.3. Irrigation

Dans le cadre du programme de développement des ressources hydriques, le ministère des ressources en eau (MRE), a développé le programme national de l'eau « PNE » qui porte sur la disponibilité en eau selon deux projections climatiques, pour la période 2010-2025 (tableau 3).

Tableau 03. Allocation en eau d'irrigation pour l'horizon 2010-2025 dans le cadre de PNE

Désignation	2000 – 2010		Horizon 2025	
	Année Moyenne	Année Sèche	Scénario 1 Année Moyenne	Scénario 2 Année Sèche
Volume d'eau total correspondant (millions de m³)	7 092	4 780	8 351	5 213

La figure 8, montre la localisation et l'irrégularité d'extension des superficies agricoles irriguées, en Algérie. Ces superficies sont en effet, réduites à l'Est du pays en relation probablement, avec la disponibilité en eau.

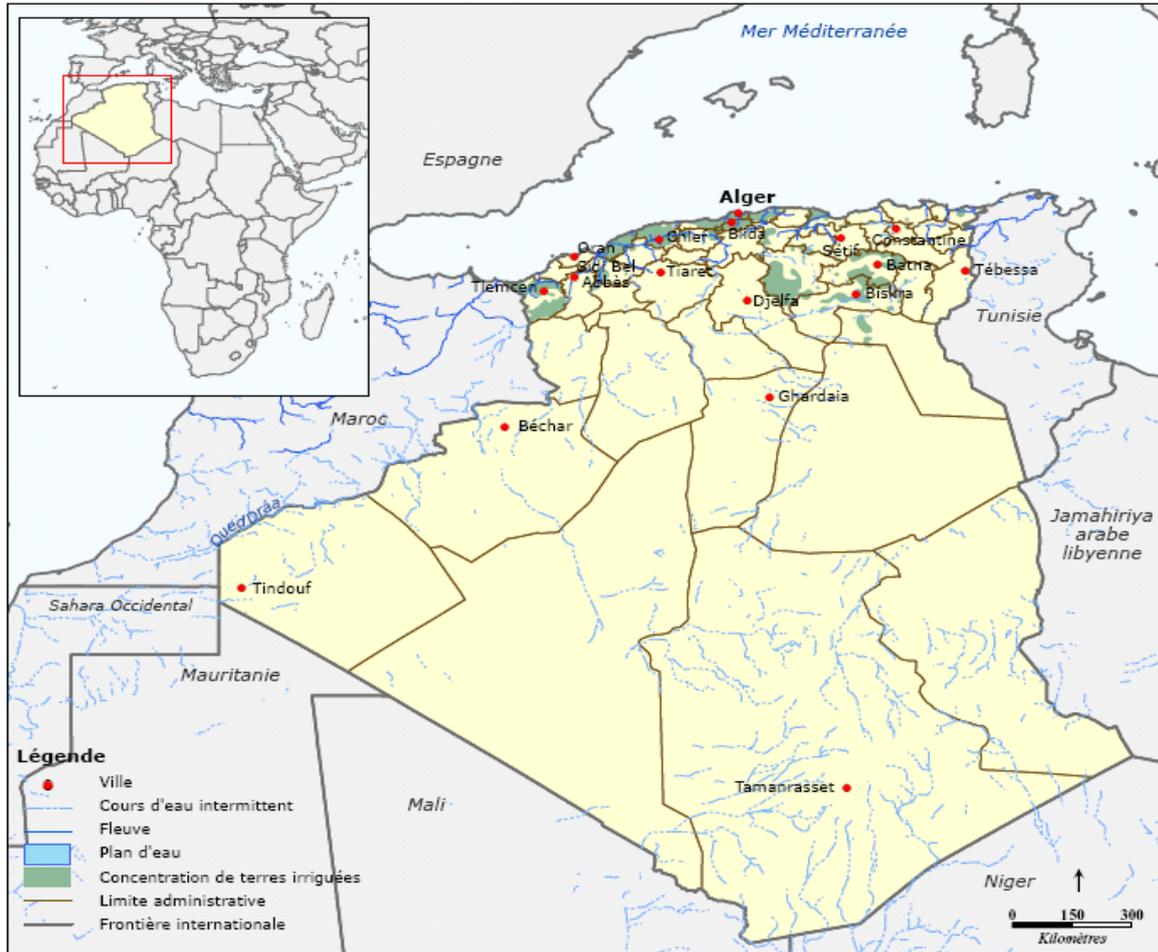


Figure 8. Répartition spatiale de superficies agricoles irriguées (source : MRE)

A titre d'exemple, dans le cadre du programme national de l'amélioration de la productivité des céréales par l'irrigation (Kious et al., 2010), une enquête a été menée par un groupe interinstitutionnels (**INSID, ITGC, OAIC, MADRP**) pour recenser et dresser un état des lieux des superficies irriguées des céréales dans la région de l'Est algérien, pour deux campagnes agricoles, 2008/2009 et 2009/2010. Le tableau 4, reflète la répartition des superficies céréalières irriguées durant les deux campagnes et montre que durant les années déficitaires, les céraliculteurs pratiquent, l'irrigation d'appoint. Toutefois selon les mêmes auteurs les superficies irriguées dans la région sont très réduites vue le manque d'équipement d'irrigation et la disponibilité au moment d'irrigation.

Tableau 04. Alerte à la sécheresse et superficies irriguées dans la zone d'étude

Wilaya	Campagne 2008/2009		Campagne 2009/2010	
	Superficie céréalières irriguées	Alerte à la sécheresse Agrométéorologique	Superficie céréalières irriguées	Alerte à la sécheresse Agrométéorologique
Constantine	0	0	0	1
Sétif	398	1	770	2
Khenchela	0	1	3000	4
Oum el Bouaghi	250	0	1405	2
Bordj BouArréridj	/	/	359	2
Tébessa	/	/	6190	2
Batna	/	/	3914	2
Mila	0	0	552	0

Source : (Kious et al, 2010)

2. Approche méthodologique

2.1. Prospection et recueil des données

Afin de faire ressortir les caractéristiques de la région, des travaux de prospections et d'investigations dans le contexte agropédoclimatique, ont été nécessaires pour identifier les sources de données ainsi, que la sélection de données les plus fiables, en particulier pour toutes données variables dans le temps à l'instar des données climatiques ou des rendements des céréales (tableau 5).

Concernant les documents cartographiques, le travail entrepris a consisté à effectuer des recherches sur les travaux antérieurs (études et base de données naturelle et physique) que nous avons numérisées et sauvegardées dans des fichiers informatiques.

Les données agricoles pour la même période d'étude, nous ont été parvenues par la Direction de statistiques agricoles et des systèmes informatiques (DSASI) du ministère de l'Agriculture, du développement rural et de la pêche. Ces données nous ont été attribuées sous format numérique et arrangées dans un fichier Excel, contenant les informations relatives aux productions, superficies emblavées, superficies récoltées et rendements des cultures (série B).

Tableau 5. Données recueillies relatives à la région d'étude

Thématiques	Organismes fournisseurs	année	Echelles et périodes
Données climatiques (pluie et températures)	ONM	//	1986-2007
Cumul pluviométrique	ANRH	//	1986-2007
Fichier numérique des positions géographiques des puits, forages et barrages	DHA	2007	Actualisé en 2009
Carte des sols de la région d'étude (Durand)	ENSA	1954	1/1000 000
Carte des précipitations annuelles du Nord de l'Algérie (Chaumont et Paquin)	ENSA	1971	1913-1938
Carte de répartition spatio-temporelle des précipitations annuelles (1986/2006)	INSID	2007	1/1000 000
Carte topographique.	INCT	2001	1/200 000
Carte du réseau hydrographique.	INCT	2001	1/200 000
Carte des sebkhatés et talus.	INCT	2001	1/200 000
Carte du couvert végétal.	INCT	2001	1/200 000
Carte des réseaux routiers et bâtis.	INCT	2011	1/200 000
Carte numérisée du découpage administratif.	INCT	2011	—
Données des surfaces emblavées et productions céréalières série B.	MADRP	2016	1986-2007
Carte d'occupation des sols agricoles	INSID	2011	1/200 000

2.1.1 Données climatiques

Les données climatiques sont recueillies, en majorité, à partir des stations météorologiques professionnelles et auxiliaires appartenant à l'Office National de la Météorologie (ONM). Quelques stations pluviométriques appartenant à l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) ont été prises en considération. Le travail de prospection, nous a permis en premier lieu à recenser 95 stations pluviométriques, dont 26 stations dotées d'un dispositif de mesure thermométriques essentiellement les stations dite professionnelle qui mesure tous les paramètres climatiques. Le constat, nous a conduit à recenser certaines stations, dont les périodes d'observation ou de fonctionnement sont très hétérogènes et contiennent des lacunes des données au niveau de leurs séries chronologiques. Ainsi, cette situation pose des problèmes pour constituer une banque de données climatiques, qui permet d'étudier l'évolution des paramètres atmosphériques à l'échelle de la région et d'évaluer ainsi, leurs impacts sur les céréales. Etant donné que l'objectif est de réaliser des cartes thématiques à partir de données récentes et de préférence complète, nous avons retenu en conséquence celles qui sont plus fiables qui sont au nombre de 65 stations pluviométriques et 20 stations

thermométriques situées dans la région et limitrophes. La figure 9, montre l'implantation des stations météorologiques à travers le territoire de la région. Nous pouvons constater que la répartition spatiale de ces stations ne couvre pas certaines parties en occurrence, la partie centrale de Bordj Bou Arreridj et celle de Tébessa, la partie Sud-Ouest d'Oum el Bouaghi, une des parties importante des wilayas de Constantine et de Khenchela.

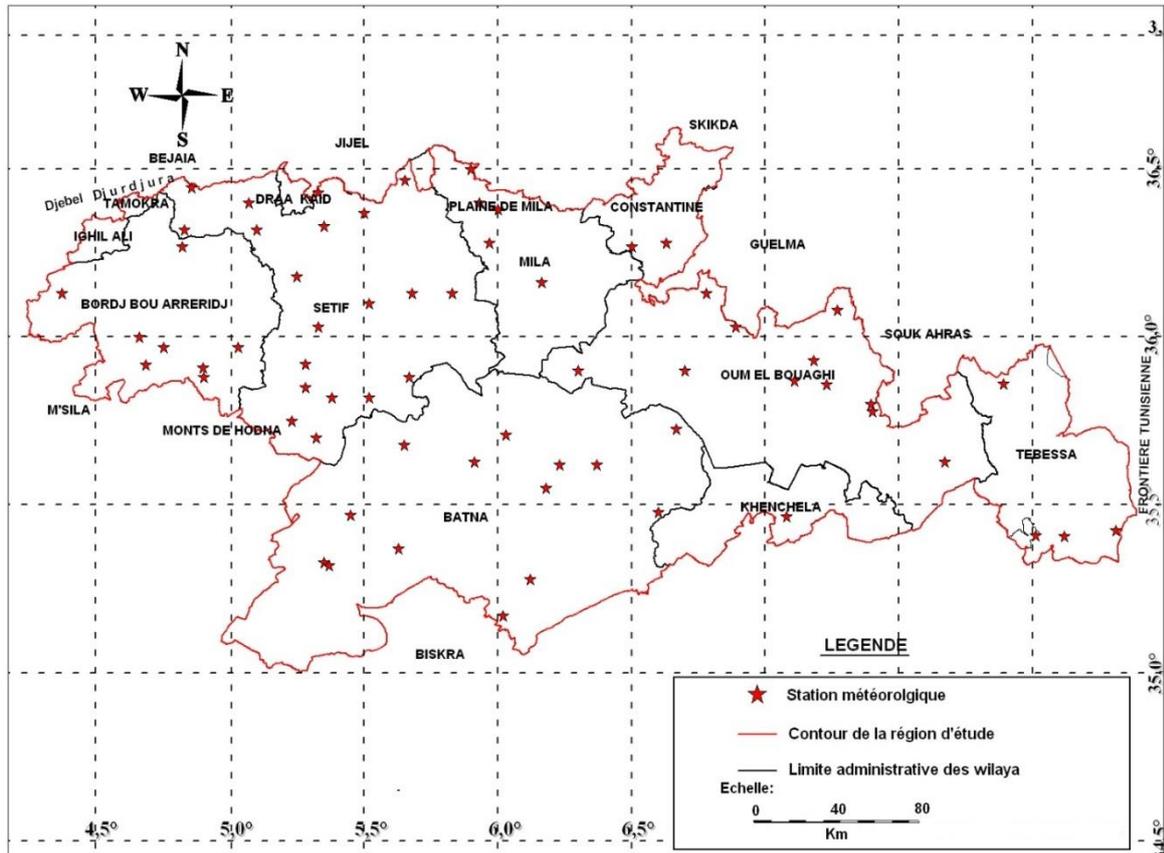


Figure 9. Localisation spatiale des stations climatiques retenues

2.1.2. Analyses 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 lors de l'enregistrement des données par l'outil informatique (erreur de saisie). En second lieu, nous avons ordonné en colonnes, les données mensuelles des stations ANRH comme celles de l'ONM. Il est à signaler que les données de l'ONM sont présentées selon l'année calendaire (de janvier à Décembre), alors que celles de l'ANRH sont présentées à partir du mois de septembre. Ce réarrangement est essentiel pour l'étape d'homogénéisation et le traitement statistique des données. Très souvent, les séries de données météorologiques observées au niveau des stations, sont incomplètes en raison d'interruptions des observations. Les interruptions peuvent être dues à un grand nombre de causes, la plus fréquente étant la rupture ou le dysfonctionnement des

instruments pendant une période de temps. Désormais, le recours aux méthodes d'homogénéisation est inévitable. Pour le comblement des lacunes d'observations rencontrées dans les séries climatiques (précipitations et températures) nous n'avons pas opté pour la méthode utilisée par Rosenberg, mais nous avons utilisé la méthode de la régression simple et la méthode d'interpolation.

2.1.3. Modélisation par régression Linéaire Multiple et tests de validation

Dans le but d'estimer le gradient local de la variable « pluie », l'outil de calcul Statistica 6.0 (Statsoft, 2003) a été utilisé pour faciliter les analyses des RLM. L'altitude, la latitude et la longitude sont des variables indépendantes. L'analyse de la régression est illustrée suivant le modèle donné dans l'équation (1) :

$$P = \beta_1.X + \beta_2.Y + \beta_3.Z + \beta_0 + \varepsilon \quad (12)$$

Avec :

P : représente la pluie et est considérée comme variable dépendante. β_1 , β_2 et β_3 sont les coefficients de la régression linéaire multiple respectivement des variables indépendantes X, Y et Z. Notant aussi, que X, représente la longitude, Y la latitude et Z l'Altitude. Le paramètre ' β_0 ' représente l'intercepte et ' ε ' les erreurs.

Une fois, le modèle de régression construit, les tests de validation ont été appliqués pour vérifier la qualité d'ajustement des modèles statistiques, incluant les tests R Multiple, R^2 , R^2 -ajusté (Cook, 1977) ainsi, que les tests statistiques de Fisher F-test, de Student-test, la racine des moyennes des erreurs au carré (RMSE) et la somme des moyennes des erreurs au carré (SMSE) (Bostanaetal, 2012; Walpole *et al*, 2007; Vargas-Guzman *et al*, 2000; Dingmanet *al*, 1988; Snee, 1986).

Le R Multiple est la valeur positive du coefficient de détermination R^2 qui mesure la proportion de variabilité expliquée par le modèle ajusté. Il est calculé comme suit :

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTE} = 1 - \frac{SSE}{SSTE} \quad (13)$$

D'où :

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \text{ Somme des carrés des erreurs ;}$$

$$SSTE = \sum_{i=1}^n \left(P_i - \bar{P} \right)^2 \text{ Somme total des carrés des erreurs} \quad (14)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n \left(\hat{P}_i - \bar{P} \right)^2 \text{ Somme des carrés de régression}$$

n : représente la taille de l'échantillon (nombre d'observations),

P_i : valeur observée de la pluie,

\hat{P}_i valeur estimée de la pluie.

R^2 adj. est calculé en divisant SSE et SST par leurs degrés de libertés libres respectifs:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{SSTE/(n-1)} \quad (15)$$

Avec :

n : le nombre d'observations, k : le nombre de variables, $(n-k-1)$ et $(n-1)$: représente respectivement le degré de liberté libre de SSE et de SST.

F-test (test de Fisher) est un test statistique dans lequel le test possède F- distribution sous une hypothèse nulle. Il est calculé comme suit:

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/(n-k-1)} \quad (16)$$

Avec :

k et $(n-k-1)$: représentent les degrés de libertés libres respectifs de SSR et de SSE.

Par ailleurs, le t -test utilise comme test de validation dans les modèles de régression multiple linéaire.

$$t = \frac{\beta_j - \beta_{j0}}{s\sqrt{\sigma}} \quad (17)$$

Avec : $s^2 = SSE/(n-k-1)$ et B_j : Coefficient ($j=0,1,2,\dots,k$).

Ces essais contribuent souvent à ce qui se nomme « criblage variable » (variable screening), où l'analyste essaie d'atteindre le modèle le plus efficace (Walpole *et al*, 2007). Le modèle approprié choisi est testé en utilisant les techniques de contre-vérification basées sur la moyenne des carrés des erreurs standardisées (SMSE) et la racine des moyennes des erreurs au carré (RMSE) qui sont utilisées ensemble pour diagnostiquer les variations des erreurs dans un ensemble de prévisions (Bostana et al, 2012; Lloyd, 2005; Miniscloux *et al*, 2001; Vargas-Guzman *et al*, 2000; Dingman *et al*, 1988). La racine des moyennes des erreurs au carré (RMSE) est utilisée pour mesurer la magnitude des erreurs. Il est calculé comme suit:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ z(x_i) - \bar{z}(x_i) \right\}^2} \quad (18)$$

La moyenne des carrés des erreurs standardisées (SMSE) est le ratio moyen des erreurs de prédiction au carré au point de validation.

$$SMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left\{ z(x_i) - \bar{z}(x_i) \right\}^2}{\sigma_{PE}^2(x_i)} \quad (19)$$

Avec : $\sigma_{PE}^2(x_i)$ la variance des erreurs de prédiction à la location x_i .

2.2. Démarche adoptée pour la cartographie numérique des données climatiques

2.2.1. Cartographie des températures

Ce travail a été focalisé sur la confection des cartes de répartition des couloirs gélifères du Nord de l'Algérie. Nous avons réalisé ces cartes dans le cadre d'un projet institutionnel regroupant deux institutions à savoir l'INSID et l'O.N.M. Ce travail prend en considération l'ensemble des stations réparties sur le territoire étudié, et ce afin de cartographier correctement la zone selon un modèle géostatistique robuste. Ce dernier nécessite un nombre de point à interpoler supérieur à 60 (Delhomme, 1976). La répartition des stations, à travers la région d'étude est au nombre de 20 stations, situation qui nous a conduit à élargir le territoire prospecté à la partie septentrionale du pays ensuite à procéder à un découpage de la partie concernée.

L'approche mise en œuvre dans l'élaboration des cartes des basses températures (gelées) a pour objectif de répondre à des questionnements d'ordre purement agronomique sur la base de données climatologiques s'étalant sur 28 ans (1980 à 2006) avec un niveau de référence de l'information ramené à hauteur des parties les plus exposées de la plante. Pour ce faire, il a été pris en considération toutes les températures quotidiennes inférieures ou égales à 1°C par rapport à l'observation réelle faite au niveau de l'abri météorologique à 2 m de hauteur. Cette démarche s'appuie sur le fait que la plupart des abris météorologiques se situent sur cette hauteur par rapport au niveau du sol.

Deux niveaux de périodicités ont été pris en considération pour la cartographie du paramètre gelée, pour faire ressortir les zones à risques à savoir :

- Gelées moyennes : correspondant à la moyenne des gelées de la période étudiée ;
- Gelées maximales : correspondant à l'année où il a eu le maximum de gelée

Le recours à la géostatistique est indispensable pour réaliser les cartes annuelles et mensuelles des gelées qui ont nécessité le recours aux programmes informatiques de calculs géostatistiques par l'usage de Variowin 2.2 (Pannatier, 1996), Surfer 8.0 et des outils SIG sous MapInfo 7.5.

2.2.2. Cartographie des pluies

En général, il est difficile de mettre en place une répartition des zones céréalières à défaut de disponibilité de données physiques et en particulier climatiques, car ces dernières proviennent particulièrement de stations d'aérodromes (donc de plaines) aux microclimats très différents. Quand l'analyse est possible, à quelques kilomètres de distance, des écarts de près de 20% sont possibles 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. Pour essayer de surmonter cette difficulté d'amplitude qui peut poser problème, nous avons jugé utile d'estimer en premier lieu le gradient de la variable dépendante "pluie" grâce au recours à la régression linéaire multiple "RLM", en second lieu passer à la méthode d'interpolation par Krigeage. La cartographie pluviométrique interannuelle a été réalisée avec le logiciel Surfer 8.0 et Mapinfo 7.5. La méthode d'interpolation géostatistique de la pluviométrie est basée sur la structure de continuité spatiale de cette variable. Cette méthode fournit un ensemble de méthodes statistiques qui décrivent une autocorrélation spatiale des données d'échantillonnage des précipitations relevés en des points (station pluviométrique).

2.2.3. Analyse géostatistique des données

. Grace à l'outil Variowin 2.2 (Pannatier, 1996), 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 dans 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. Dans sa conception générale, la valeur krigée ou prédite $Z(x_0)$ est une combinaison linéaire d'observations à N_{nb} stations voisines (Bargaoui et Chebbi, 2009). Le krigeage est appliqué pour estimer les valeurs des lieux non échantillonnés de pluie en utilisant les points autour de lui. L'estimateur de krigeage s'écrit comme suit :

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^{N_{nb}} \lambda_i Z(x_i) \quad (20)$$

2.2.4. Analyse spatiale des données physiques

2.2.4.1. Modèle numérique du terrain (M.N.T)

Un Modèle Numérique de Terrain est un fichier numérique présentant de manière régulière les altitudes localisées par leurs coordonnées géographiques dans une zone géographique. Les altitudes ont été interpolées au départ par rapport à des points de référence liés aux courbes de niveaux et aux points cotés. Le support de ce modèle peut être une représentation raster (division régulière de l'espace par des mailles carrées généralement) ou en mode vectoriel.

Le MNT avec des pixels carrés de tailles 30 m a été généré à partir des points cotés et les points digitalisés à partir des courbes de niveau sur la base des cartes topographiques provenant de l'Institut National de la Cartographie et de la Télédétection (I.N.C.T., 2001). Le MNT a été développé en utilisant l'extension vertical mapper 03 du logiciel Mapinfo.

2.2.4.2. 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, en occurrence l'extension vertical mapper 03 du logiciel Mapinfo, la proportion de la surface liée à une classe de pente bien déterminée. Il est noté que la conception de la carte des pentes est établie à partir du M.N.T.

2.2.4.3. Carte des sols

L'indisponibilité des données et d'études récentes caractérisant les sols de la zone d'étude, nous a conduit à retenir la carte des sols du Nord de l'Algérie réalisée par Durand (1954). Cette carte analogique a été numérisée afin qu'elle soit utilisée dans des différents traitements par SIG. Ce traitement fait ressortir plusieurs types de sols (tableau 06). La répartition des superficies par classes de sols 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 6. Superficies des sols par classes

Classes de sols	Superficies en hectares	Taux de superficies
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

2.2.5. 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. Aussi, l'utilisation des programmes et logiciels informatiques est primordiale pour facilitation des traitements statistiques et illustration graphique. La présente étude, a nécessité l'utilisation de quelques outils parmi lesquels :

- **Microsoft Excel 2013**, à l'aide duquel une représentation graphique des paramètres climatiques étudiés a été faite ;
- **Statistica 6.0**, avec lequel nous avons calculé les différentes composantes de l'équation polynomiale des précipitations et statistique élémentaire ;
- **Variowin 2.2**, à l'aide duquel, nous avons obtenu les résultats de la modélisation géostatistique
- **Surfer 8.01**: Ce logiciel nous a permis de réaliser la cartographie numérique de paramètres climatiques à partir des données, son utilisation vient après l'étude variographique;

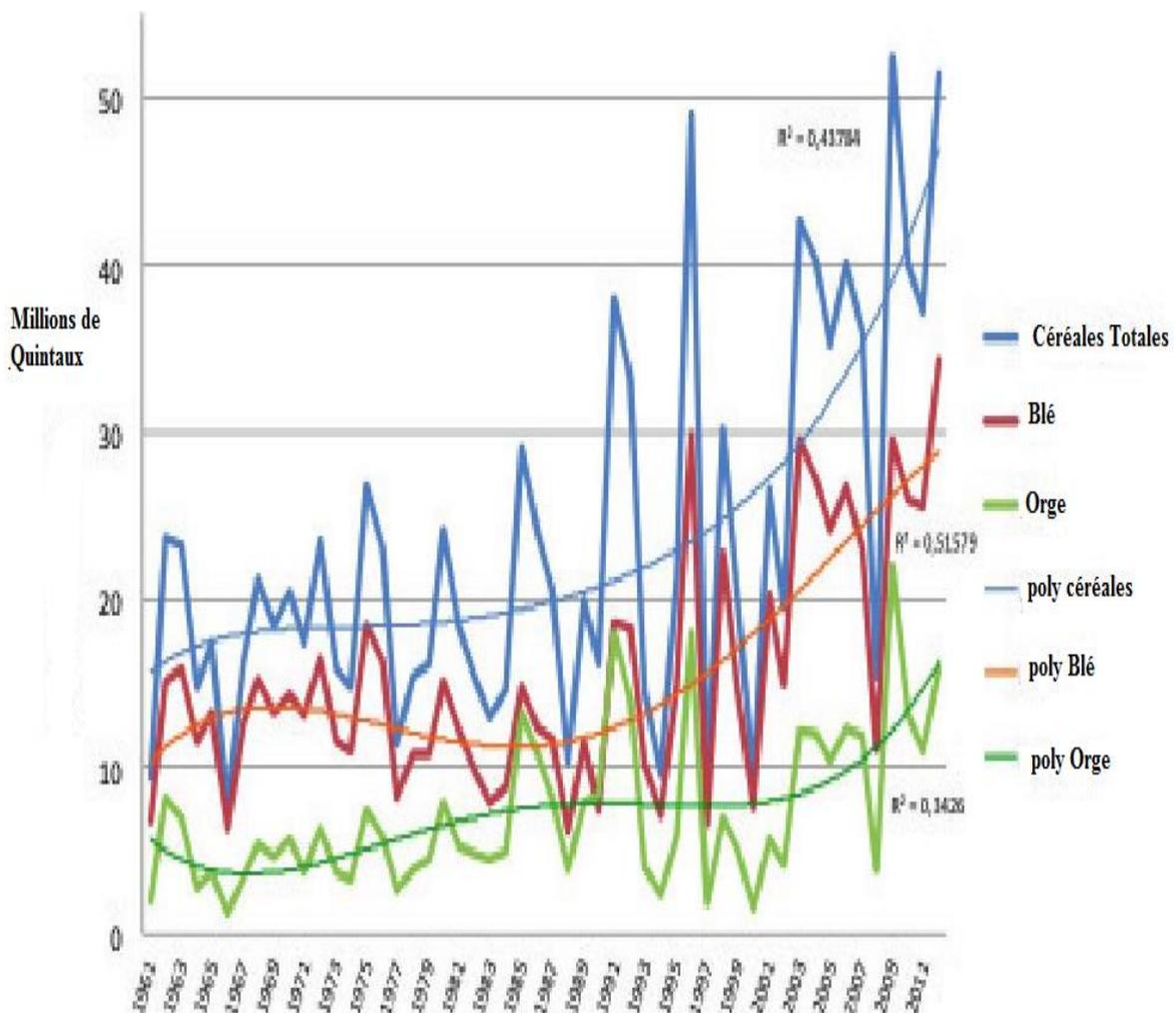
- **MapInfo Professionnel 7.5**, est un logiciel qui est conçu pour fonctionner dans un environnement Windows. Nous l'avons utilisé pour accéder à quelques fonctions (géo-référencement, digitalisation, nettoyage, superposition de couches d'informations et présentation);
- **Vertical Mapper 3.0** (Northwood Technologies and Marconi Mobile Limited, 2001), est une extension construite de telle façon qu'elle soit conformément opérationnel avec le programme MapInfo.

Troisième Chapitre

Résultats et Discussion

1. Aperçu et lecture sur des données statistiques

Sur la base des données agricoles qui nous ont été parvenues par la Direction des statistiques agricoles et des systèmes d'informatique (DSASI) du MADRP et les données affichés par la FAO (FAO, 2013), la production de céréales en Algérie est marquée par une forte irrégularité (Figure 10), sur les 40 dernières années, on enregistre un écart très important entre une année calamiteuse (9,7 millions de q en 1994) et une année d'abondance (52,5 millions de q en 2009). Cependant, les progrès technico-économiques, s'ils ne parviennent pas à stabiliser la production des céréales, ont permis de l'augmenter sensiblement la moyenne décennale. Cette moyenne a presque doublé entre 1981 et 1990 (18,2 millions de q) et 2001-2010 (34,9 millions de q), avec une progression régulière qui a permis d'accompagner la progression démographique (de 19 à 38 millions d'habitants entre 1980 et 2012).



Source : Données FAOstat, 2013

Figure 10. Production céréalière pour la période 1962-2012

Les surfaces réservées aux céréales au cours de la période étudiée avoisinent les 2.7 millions d'hectares en moyenne, dont 1.03 millions d'hectares sont occupés en moyennes par les blés durs. La production est marquée par une stagnation sur une longue période. Cependant, la production du blé dur en Algérie n'a pas atteint dans les meilleurs des cas les 20 millions de quintaux sur une superficie emblavée et récoltée de 1 039956 ha avec un rendement moyen de 15 q/ha durant la campagne 2003/2004 (table 07).

Tableau 07. Etat des lieux des superficies, des productions et des rendements en céréales et en blé dur en Algérie durant la période (1984-2006).

Campagnes céréaliers	Total céréales d'hiver			Blé dur			
	Superficie	Production	Rendement	Superficie	Taux de surface des blés durs 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

Source : DSASI 2007

A travers les informations fournies par le tableau 07, nous pouvons ressortir deux périodes importantes à savoir :

- 1) période allant de 1984 jusqu'à 1994, caractérisée par des rendements moyens des céréales ne dépassant pas dans les meilleures années (1984 et 1991) les 8,8 q/ha, ce qui a induit à une situation d'années très peu productives en blés ;
- 2) période allant de 1995 jusqu'à 2006, caractérisée par un rendement sensiblement amélioré ne dépassant pas aux meilleures années (2003 et 2004) les 15,3 q/ha. Par ailleurs, les superficies emblavées ont enregistré une stationnarité et 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. Devant une telle 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 (Figure. 11).

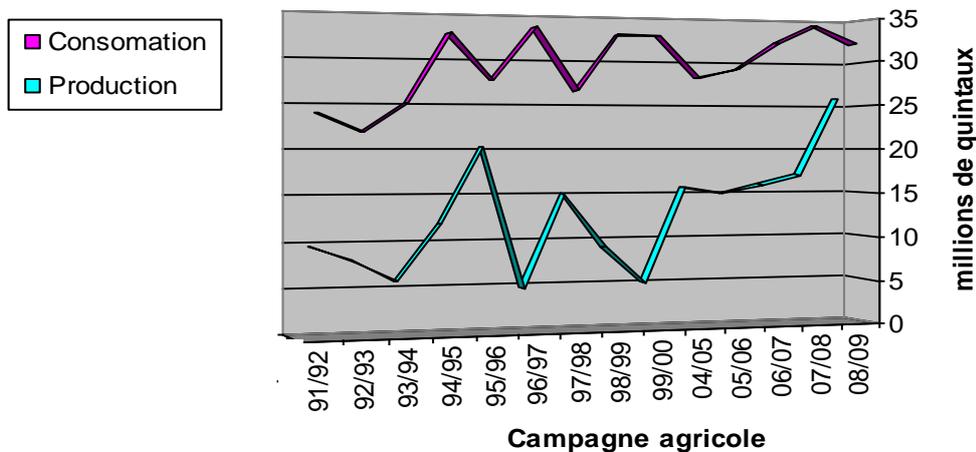


Figure 11. Production et consommation de blé dur en Algérie durant la période 1991- 2009 (CIC, 2010).

2. Données climatiques

2.1. Analyse des données climatiques

L'importance des données climatiques pour le développement de notre étude, nous a conduit à choisir la région céréalière qui dispose du maximum de stations de mesures. Très souvent, les séries de données contenant une variable météorologique observée au niveau d'une station donnée sont incomplètes en raison d'interruptions des observations, dues à un grand nombre de causes. Tenant compte des standards d'installation des stations météorologiques avec une couverture de 20 à 40 Km² en plaines et approximativement 2 Km²

en zones de reliefs (Bertrand-Krajewski et al. 2000), nous pouvant 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.

L'application des méthodes statistiques présentées dans le chapitre étude bibliographique nous ont permis de combler les lacunes dans les séries climatiques. Nous avons choisi des stations de références possédant de séries continues et homogènes correspondant aux périodes étudiées. 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 Ouled Si Slimane;
- Medfoune située dans la wilaya d'Oum El Bouaghi 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

2.2. Description des données

Nous avons attribué des chiffres aux stations météorologiques de la région d'étude pour les codifier (table 8), ce qui permettra une présentation pratique des graphiques et une facilité dans l'interprétation (figure 12).

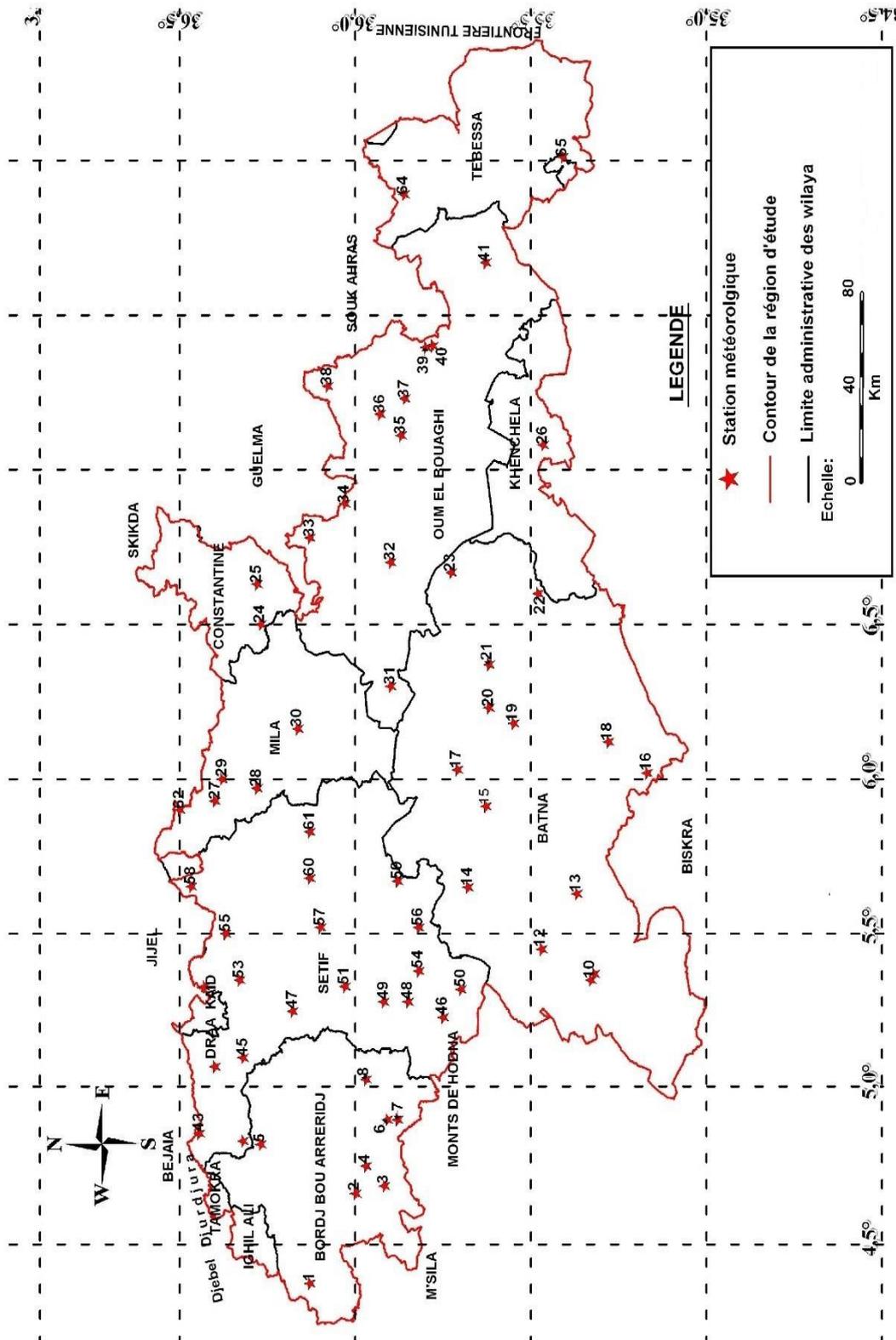


Figure 12. Répartition des stations pluviométriques dans la région d'étude

Tableau 08. Situation géographique des stations météorologiques

Code des stations	Wilaya	Appellation de la station	Latitude (degré)	Longitude (degré)	Altitude (m)
1	Bordj Bou Arreridj	El Mehir	36,13	4,37	550
2	Bordj Bou Arreridj	B.B.A	36,00	4,66	928
3	Bordj Bou Arreridj	Bouaziz	36,27	4,82	850
4	Bordj Bou Arreridj	El Hamadia	35,97	4,75	850
5	Bordj Bou Arreridj	Ghafsitiane	35,93	4,67	900
6	Bordj Bou Arreridj	Ras El Oued	35,97	5,03	1000
7	Bordj Bou Arreridj	Bordj Ghdir ANRH	35,91	4,90	1054
8	Bordj Bou Arreridj	Bordj Ghdir ONM	35,88	4,90	1050
9	Batna	Barika	36,33	5,35	460
10	Batna	O.S.Slimane	35,47	5,45	622
11	Batna	Bitam	35,32	5,37	474
12	Batna	Ras El Ayoun	35,68	5,65	880
13	Batna	Seggana	35,37	5,63	673
14	Batna	Merouana	35,63	5,91	1000
15	Batna	Batna A	35,71	6,03	468
16	Batna	Tifelfel	35,62	6,23	800
17	Batna	Attouta	35,55	6,18	471
18	Batna	Bouzina	35,28	6,12	1350
19	Batna	Menaa	35,17	6,02	1000
20	Batna	El Madher	35,62	6,37	913
21	Batna	Boulhilet	35,73	6,67	985
22	Batna	Toufana	35,48	6,60	1040
23	Constantine	Ain Smara	36,27	6,50	680
24	Constantine	Constantine	36,28	6,63	419
25	Khenchela	Khenchela	35,47	7,08	983
26	Mila	Ferdjioua	36,40	5,93	580
27	Mila	Beni Guecha	36,38	6,00	550
28	Mila	Ain Trik	36,28	5,97	1100
29	Mila	Chelghoum Laid	36,16	6,16	768
30	Oum el Bouaghi	Bir Chouhada	35,90	6,30	800
31	Oum el Bouaghi	Sigus	36,13	6,78	820
32	Oum el Bouaghi	Ain Kercha	35,90	6,70	780
33	Oum el Bouaghi	A. El bordj	36,03	6,89	780
34	Oum el Bouaghi	O.E.B	35,87	7,11	889
35	Oum el Bouaghi	Ksar Sbahi	36,08	7,27	850
36	Oum el Bouaghi	Ain Babouche	35,93	7,18	893
37	Oum el Bouaghi	Medfoun	35,86	7,23	900
38	Oum el Bouaghi	Ain El Beida ANRH	35,80	7,40	1004
39	Oum el Bouaghi	Ain El Beida ONM	35,78	7,40	1000
40	Oum el Bouaghi	Meskiana	35,63	7,67	970
41	Setif	Ourtilen	36,45	4,86	1020
42	Setif	Guenzet	36,32	4,83	1100
43	Setif	Maoklane	36,40	5,07	950
44	Setif	Bougaa	36,32	5,10	886
45	Setif	Setif	36,18	5,25	1030
46	Setif	Tizi Nbechar	36,43	5,33	900
47	Setif	Guellal	36,03	5,33	908
48	Setif	A.Oulmane	35,92	5,28	960
49	Setif	Saleh Bey	35,85	5,28	978
50	Setif	A.El Kebira	36,37	5,50	1020
51	Setif	Ras El Ma	36,10	5,52	980
52	Setif	Beni Aziz	36,47	5,65	750
53	Setif	El Eulma	36,13	5,68	964
54	Setif	Beida Bordj	35,88	5,67	895
55	Setif	Bouandas	36,50	5,90	580
56	Setif	Bir El Arch	36,13	5,83	950
57	Setif	Rasfa	35,75	5,23	1100

Code des stations	Wilaya	Appellation de la station	Latitude (degré)	Longitude (degré)	Altitude (m)
58	Setif	O.Teben	35,82	5,38	1030
59	Setif	Boutaleb	35,70	5,32	960
60	Setif	Meghres	35,33	5,35	450
61	Setif	Ain Azel	35,82	5,52	960
62	Tebessa	El Aouinet	35,86	7,89	654
63	Tebessa	Tebessa	35,41	8,01	820
64	Tebessa	Tabessa ANRH	35,41	8,12	850
65	Tebessa	Tebessa pciv	35,42	8,31	853

2.2.1. 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 13.

Les tests de statistiques fondamentales appliqués pour les données annuelles pour la période 1986-2007 avait pour but de caractériser la variabilité de l'ensemble de données.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 13, les valeurs moyennes annuelles des précipitations fluctuent considérablement d'une station à une autre avec des cumuls qui varient entre 127 mm dans la station d'Ain Kercha (code 32) et 752,2 mm à Beni Aziz (code 52). Ces deux stations sont situées sur des altitudes respectives de 780 m pour Ain kercha et 750 m pour Beni Aziz, nous pouvons voir que le cumul maximum de précipitations ne coïncide nécessairement pas avec la plus haute altitude. Ce constat a été aussi rapporté par Subyani and Al-Dakheel (2009) dans leur étude effectuée en Arabie Saoudite.

Les précipitations annuelles moyennes de la zone d'étude sont de 362,5 mm avec un coefficient de variation de 0,33 et un écart-type de 122,33 mm. En référence à la moyenne pluviométrique de la région $P=362.5$ mm, 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.

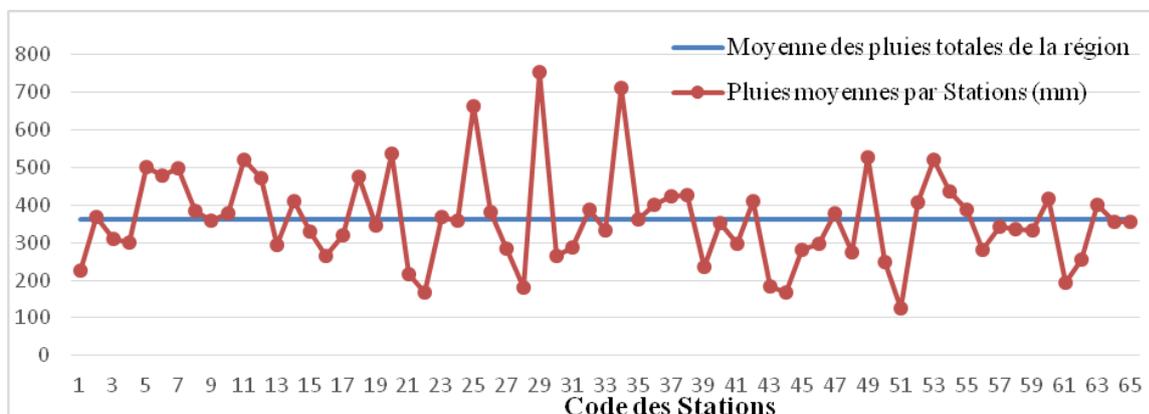


Figure 13: Pluies annuelles de l'ensemble des stations réparties sur la région d'étude période (1986-2007)

La figure 14, fait ressortir la répartition des stations pluviométriques par classes de pluies annuelles. Nous pouvons constater qu'il existe 14 stations enregistrant des cumuls pluviométriques moyens compris 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 au nombre de 22 enregistre des cumuls pluviométriques moyens supérieurs à 400 mm.

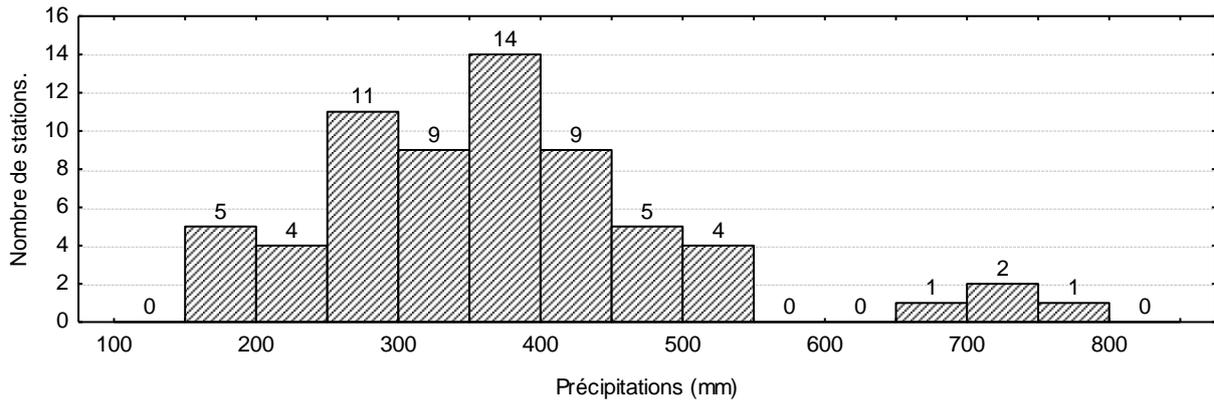


Figure 14. Répartition des stations par classes de pluies annuelles

Les tests de symétrie, Kolmogorov-Smirnov et de kurtosis ont été appliqués pour caractériser la fréquence des précipitations et de la forme de distribution. La valeur de test calculée de Kolmogorov-Smirnov ($K-S = 0,1$) à l'hypothèse nulle était inférieure à la valeur critique correspondante de la signification ($p = 0,614$). Ainsi, l'hypothèse concernant la forme distributive n'est pas rejetée car la valeur $K-S$ est inférieure à la valeur critique de signification. De plus, dans le tableau 09, la valeur d'inclinaison est égale à 0,85, indiquant que la distribution est modérément faussée avec une queue asymétrique s'étendant vers des valeurs positives. La valeur de kurtosis ou test d'aplatissement calculé (1,52) est inférieure à 3, une distribution normale possède une valeur de kurtosis égale à 3 (Bulmer, 1979), ce qui indique que la distribution est Platykurtique, signifiant que la probabilité pour des valeurs extrêmes est inférieure à une distribution normale et les valeurs sont plus larges autour de la moyenne (Walpole et al, 2007; Bulmer, 1979).

Tableau 09. Statistiques descriptives et test de normalité

Statistique	Pluie	Longitude	Latitude	Altitude
Minimum	127,06	4,37	35,17	419
Maximum	752,13	8,31	36,5	1350
Moyenne	362,44	5,986	35,91	855,88
Premier quartile	284,28	5,31	35,66	777
Troisième quartile	413,57	6,64	36,16	988,75
Erreur Standard	15,17	0,11	0,042	24,06
Déviaton moyenne	89,80	0,77	0,278	150,97
déviaton Standard	122,33	0,95	0,34	194,02
Coefficient de variation	0,33	0,15	0,0095	0,22
Skew	0,85	0,64	-0,16	-0,62
Kurtosis	1,52	-0,34	-0,82	0,14
K-Smirnov	0,1	0,118	0,08	0,15
p-value	0.614	0.071	0.375	0.002

2.2.2. Précipitations mensuelles

Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles ont le même comportement au cours de la période étudiée, pour quasiment l'ensemble des stations de mesure étudiées. Ces dernières affichent des périodes pluvieuses qui commencent pour la plupart des années en mois de septembre et se terminent en mois de juillet.

Les représentations des classes de précipitations annuelles ou mensuelles obtenues montrent les effectifs de stations qui possèdent des moyennes pluviométriques rapprochées.

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'excédant 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 15, 16 et 17)

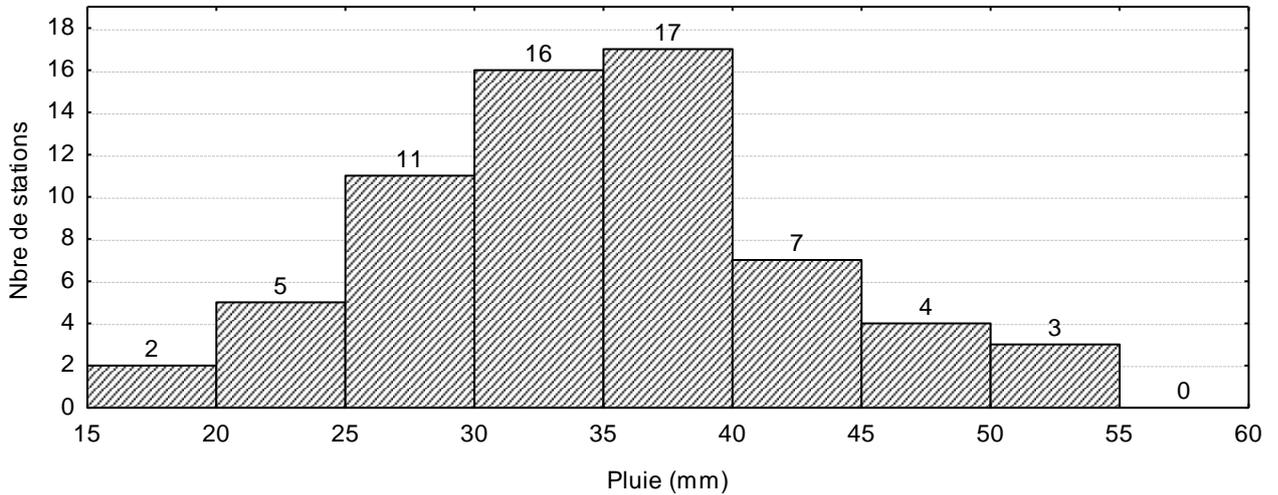


Figure 15. Répartition des stations par classes de pluies (mois de septembre)

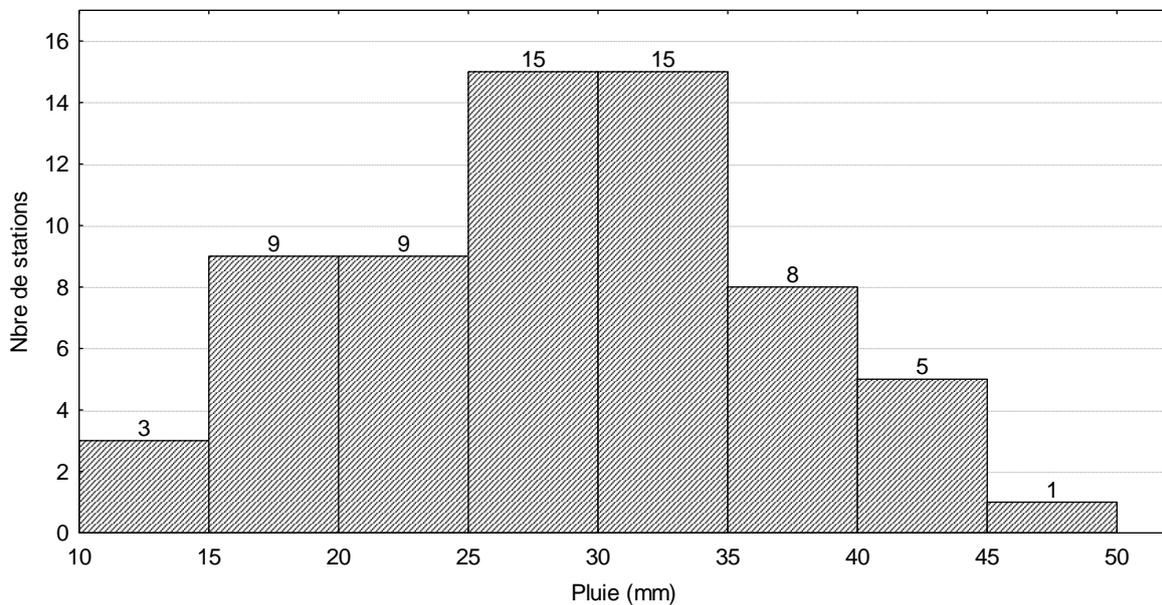


Figure 16. Répartition des stations par classes de pluies (mois d'octobre)

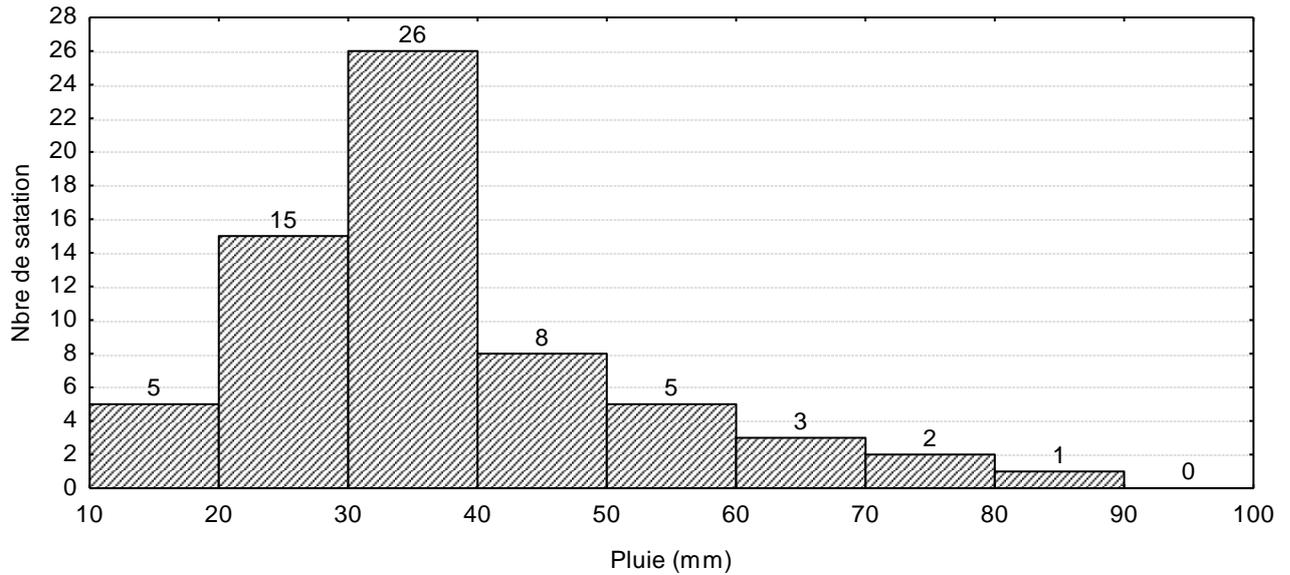


Figure 17. Répartition des stations par classes de pluies (mois de novembre)

Les cumuls des précipitations moyennes de la période d'étude restent les plus élevés 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 où enregistre des pics importants durant l'année, avec des cumuls compris entre 120 mm et 140 mm enregistrés dans 3 stations et des cumuls exceptionnels de 180 mm dans une station (figures 18). Toutefois, des cumuls de pluies moyens compris entre 40 mm et 100 mm sont enregistrés dans 31 stations. Néanmoins, 31 stations enregistrent en mois de décembre des cumuls pluviométriques inférieurs à 40 mm. Le nombre de stations dont le cumul pluviométrique est supérieur à 40 mm est le plus important avec 36 stations, le plaçant comme le mois le plus pluvieux de l'année. Pour le mois de janvier (figures 19), la répartition des stations par classes de pluies dénote d'une certaine diminution des cumuls. Les pluies comprises entre 40 et 100 mm, sont seulement enregistrées dans 24 stations et les pics ne dépassent pas les 100 mm. Pour les stations qui enregistrent des pluies inférieures à 40 mm elles sont au nombre de 38. Par ailleurs le mois de février est le mois le moins pluvieux de la saison hivernale (figures 20), où 17 stations dont le cumul est supérieur à 40 mm et 48 stations dont le cumul enregistrés est inférieur à 40 mm avec 21 stations inférieure à 20mm.

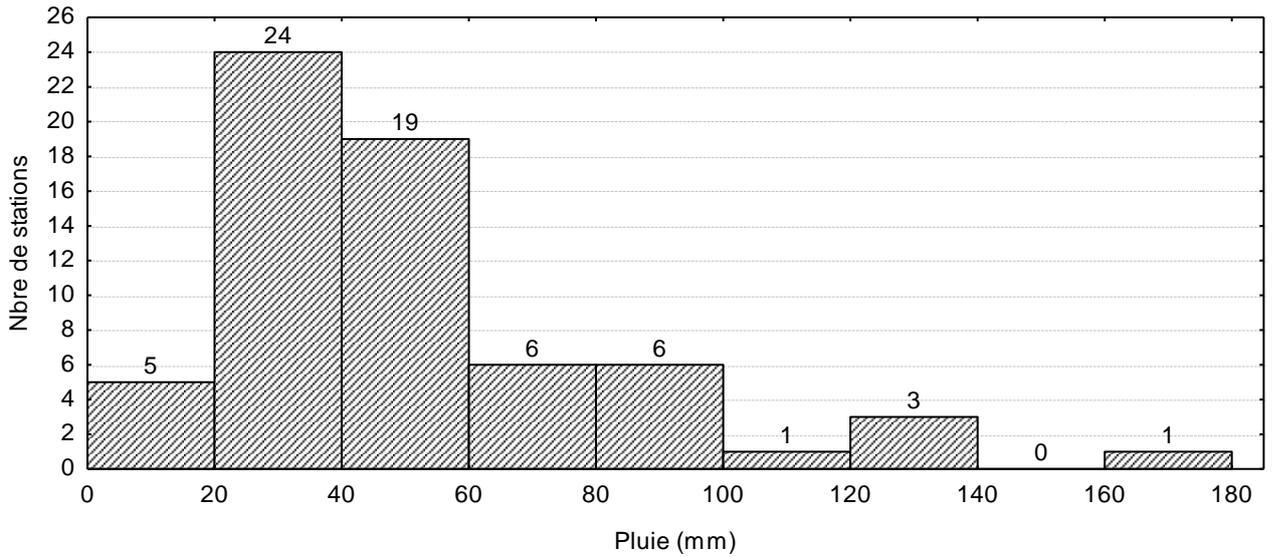


Figure 18. Répartition des stations par classes de pluies (mois de décembre)

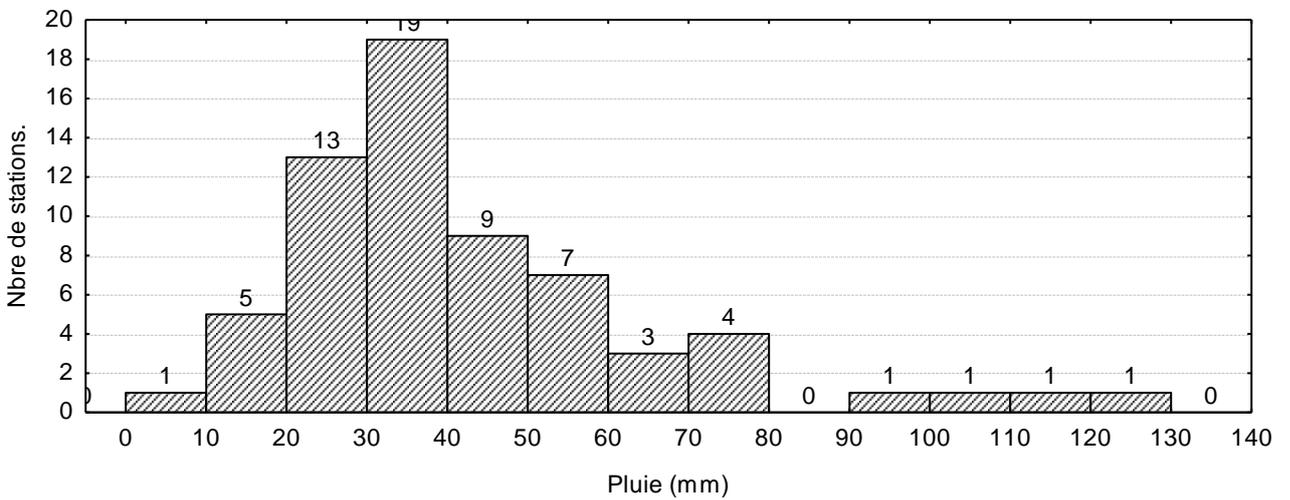


Figure 19. Répartition des stations par classes de pluies (mois de janvier)

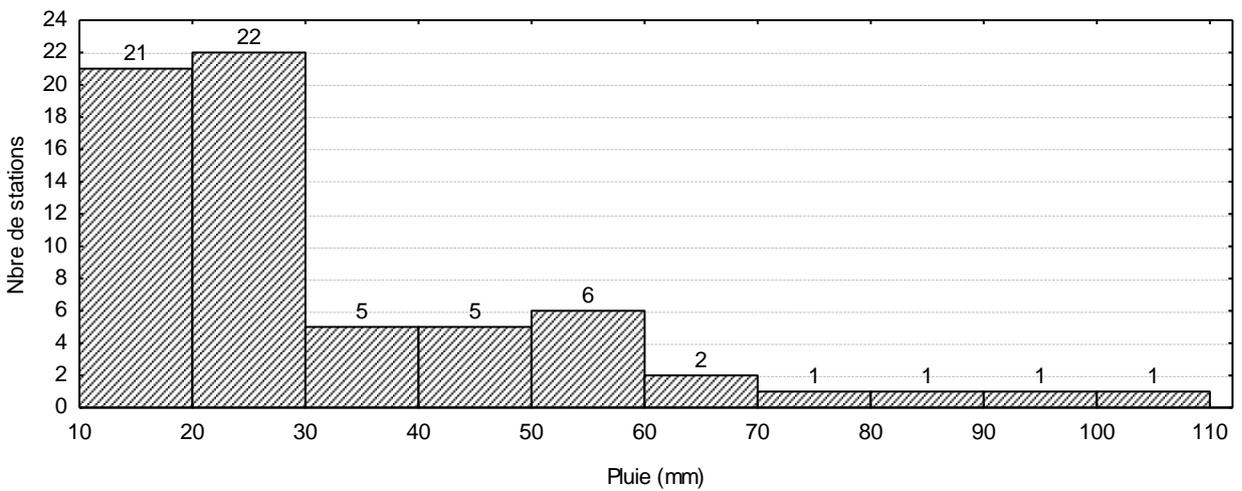


Figure 20. Répartition des stations par classes de pluies (mois de février)

En revanche, les cumuls pluviométriques moyens mensuels de la saison printanière sont faibles (figures 21, 22 et 23). En mois de mars 50 stations enregistrant des cumuls compris entre 20 et 40 mm. La répartition des stations par classes de pluie pour le mois d'avril montre qu'il existe 42 stations enregistrant des cumuls compris entre 20 et 40 mm. Les stations qui enregistrent des pluies supérieures à 40 pour les deux premiers mois de printemps sont minimales. L'exception est faite pour le mois de mai, 27 stations enregistrent une moyenne pluviométrique comprise entre 20 et 40 mm et 31 stations enregistrent des cumuls supérieurs à 40 mm.

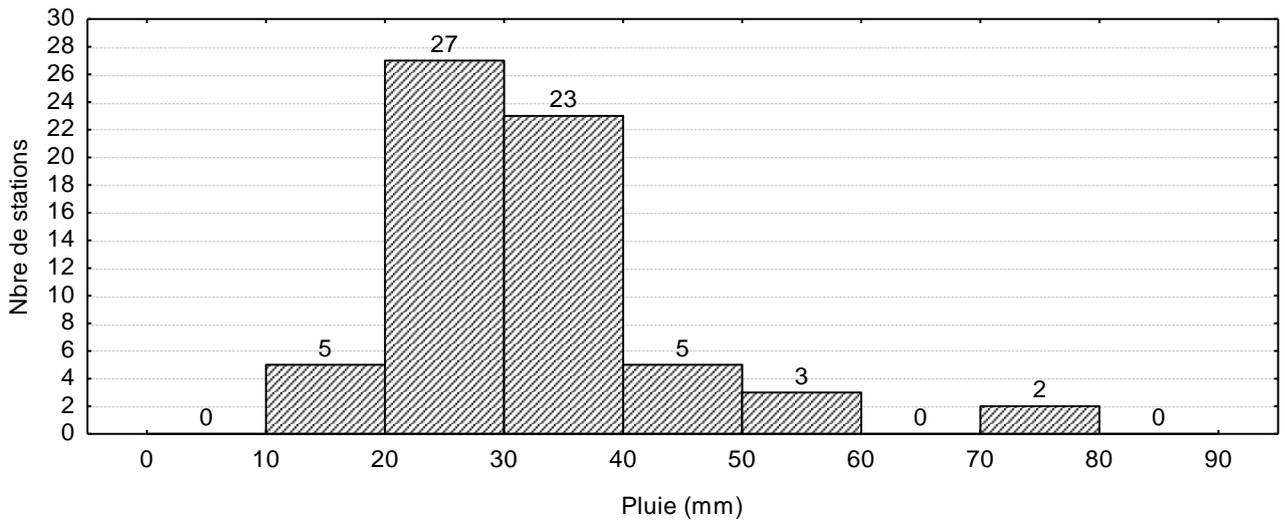


Figure 21. Répartition des stations par classes de pluies (mois de mars)

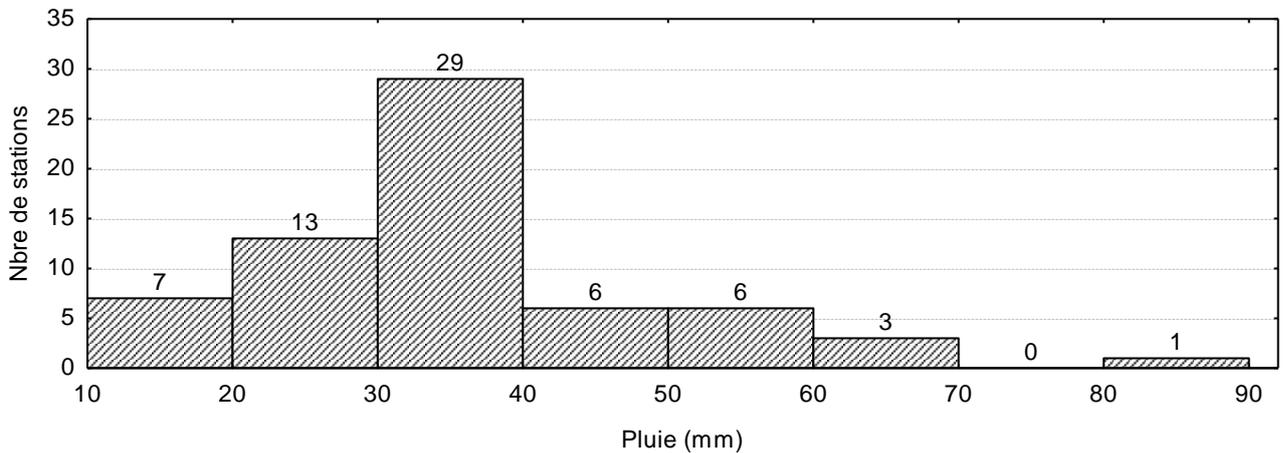


Figure 22. Répartition des stations par classes de pluies (mois d'avril)

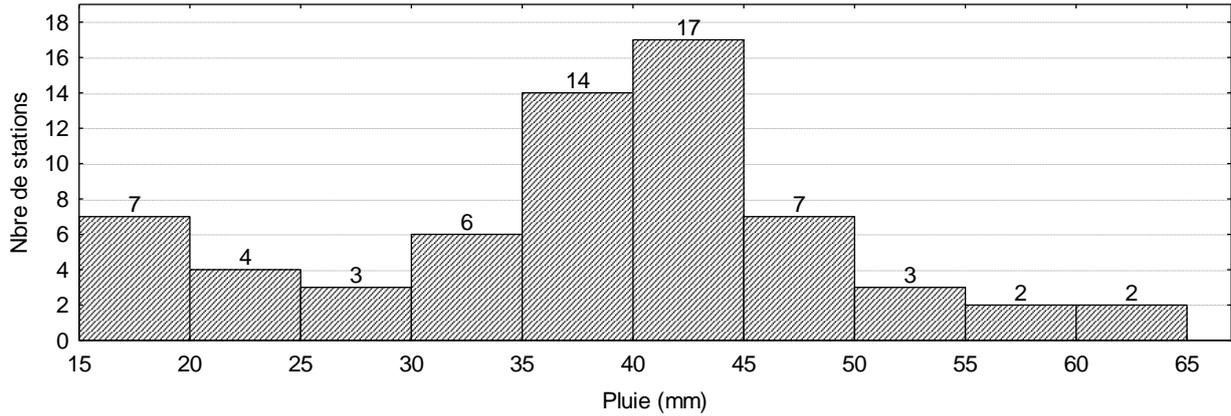


Figure 23. Répartition des stations par classes de pluies (mois de mai)

A partir du mois de juin (Figure 24) les pluies deviennent faibles ne dépassant pas les 35 mm et la plus part des stations enregistrent des cumuls compris entre 10 et 25 mm repérés dans 44 stations. Durant les mois d’été, les cumuls au niveau des stations dans la région d’étude diminuent progressivement et de moins en moins et d’une manière considérable pour devenir insignifiants en juillet et août.

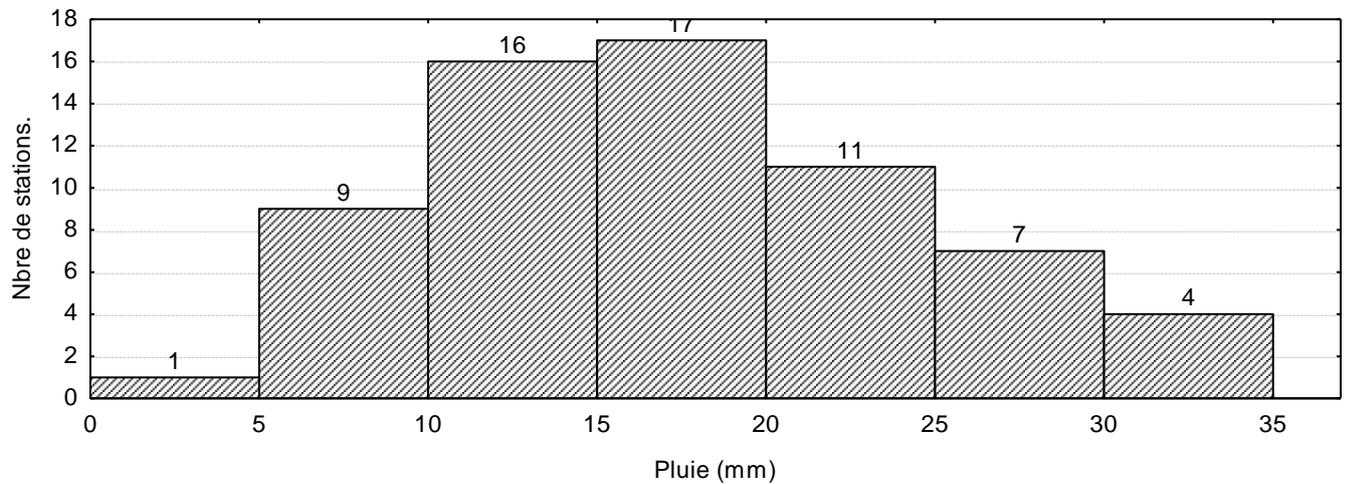


Figure 24. Répartition des stations par classes de pluies (mois de juin)

3. Analyse et modélisation des pluies par régression linéaire multiple

3.1. Pluies annuelles

Il est intéressant d’expliquer le comportement des précipitations influencé par l’effet combiné des paramètres géographiques en occurrence : la longitude, la latitude et l’altitude. A cet effet, un modèle spécifique aux précipitations annuelles est développé par Régression linéaire multiple RLM pour les 65 stations pluviométriques retenues. Ce modèle, utilise les pluies annuelles cumulées de chaque station comme variable à expliquer, et utiliser les

coordonnées géographiques de ces stations comme variables explicatives à savoir, longitude (X), la latitude (Y) et l'altitude (Z). Le modèle de régression explicatif des précipitations (P) par régression multiple s'écrit comme suit :

$$P(mm) = 17,06.X + 261,25.Y + 0,04.Z - 9159 + \varepsilon \quad (9)$$

X, Y et Z étant, respectivement, longitude, latitude et altitude. ε représente l'erreur de l'estimation qui est égal à 89,92.

D'après l'équation de régression (21), nous pouvons observer que la constante joue un effet négatif important sur les précipitations annuelles, avec une valeur de - 9159. Aussi d'après la même équation, l'effet de chaque paramètre géographique ressort, et que le second paramètre qui affecte les pluies est la latitude avec un coefficient de 261,25. Aussi, le coefficient de l'altitude affecte moins sur les précipitations annuelles avec un coefficient de 0,04 et a un degré moins le coefficient de la longitude avec une valeur de 17,06.

Le tableau 10 présente les valeurs des coefficients de régression et les tests de validation du modèle RLM. Selon le tableau 10, les coefficients d'ajustement du modèle RLM de pluie est relativement faible avec R , R^2 et R^2 ($R^2 = 0.595$, $R = 0.703$ et R^2 ajusté = 0.515).

Le test de Fisher 'F' a été utilisé pour vérifier l'importance globale du modèle RLM développé. L'avantage du test F par rapport au test d'ajustement R^2 est que le test F prend en considération les degrés de liberté, qui dépendent de la taille de l'échantillon et du nombre de prédicteurs dans le modèle ($F(3,61) = 19.41$, $p\text{-value } p = 0.00000$). En outre, le test t, le RMSE et le MSE ont été utilisés pour évaluer les performances de l'équation MLR ($t = -7.126$, $p\text{-level} = 0.00000$, $RMSE = 0.15$, $MSE = 0.023$) indiquant que le modèle MLR est significatif au niveau 0,05 niveau de confiance. De plus, X ($t = 7.454$, $p = 0.000000$) et l'interception ou la constante β_0 avec ($t = -7.454$, $p = 0.000000$) sont des variables explicatives très significatives, indiquant des valeurs t plus élevées et une très faible valeur p au niveau de signification 95%. Cependant, Y ($t = 1.354$, $p = 0.180$) et Z ($t = 0.758$, $p = 0.450$) sont statistiquement non significatif dans l'estimation RLM.

Tableau 10. Coefficients de RLM et les tests de validations

Synthèse des coefficient			
	β	t-test	p-level
origine	-9159	-7,082	0,000000
Longitude	17,06	1,354	0,180
Latitude	261,25	7,454	0,000000
Altitude	0,04	0,758	0,450
Cross validation of MLR			
Multiple -R	0,703	ϵ	89,9
R²	0,595	t-test	-7,126
R²_{adjusted}	0,515	p-level	0,00000
MSE	0,023	df	3,61
RMSE	0,15	F-test	19,97

L'équation de régression montre l'impact de chaque paramètre géographique sur les précipitations. Le poids de la latitude est le plus important que le poids des autres paramètres. Avec un coefficient de 17,06, la longitude affecte légèrement les précipitations. En outre, l'altitude avec un coefficient de 0,04 a un effet négligeable sur les précipitations. Cela peut être dû au fait que le relief n'est pas suffisamment contrasté dans la zone d'étude. Pour mieux expliquer cette hypothèse et situation, une carte de pente de la région a été développée (Fig 25).

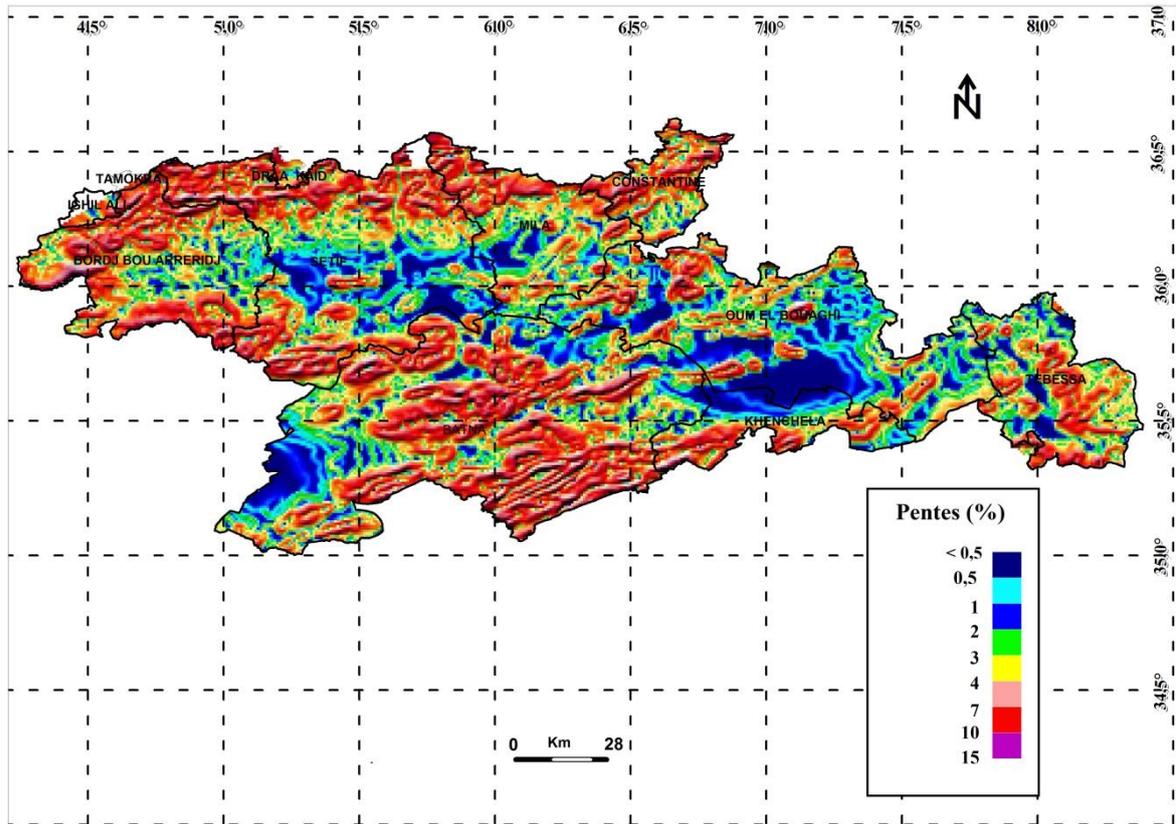


Figure 25 : Carte des pentes de la région d'étude

Une superficie de 29738 km² se compose principalement de hauts plateaux avec de faibles pentes (<5%), représentant ainsi, 88,5% de la superficie totale de la région d'étude. Aussi, 11% de la superficie totale couvre des zones avec une pente comprise entre 5 et 10% (Tab.11).

Tableau 11. Distribution des pentes dans la région d'étude

Intervalle de pente (%)	Surface (km ²)	Pourcentage des surface des pentes / à la surface totale.
< 5	29738.13	88.48
5 – 10	3697.10	11
10 – 15	151.24	0.45
>15	23.53	0.07

Une deuxième hypothèse surgit pour consolider la première hypothèse qui vient après le constat fait à partir du tableau (08) qui montre que la majorité des stations (45 stations), se situent sur une élévation comprise entre 800 et 1100 m d'altitude. Situation qui nous a conduit a posé la deuxième hypothèse : est ce que le cumul pluviométrique le plus important peut coïncider avec l'altitude la plus élevée dans la région d'étude? Pour essayer de répondre à cette question, nous avons tracé une courbe de corrélation entre les pluies et les altitudes de chaque station. Le coefficient de corrélation a été calculé selon l'équation de corrélation

pluie/altitude et s'exprime comme suit:

$$P = 324,93 + 0,056 Z \tag{10}$$

Avec R = 0.099, P: Précipitations (mm) et Z: Altitude (m).

Le R calculé confirme la corrélation non significative (R = 0,099) entre les précipitations et l'altitude (Fig.26)

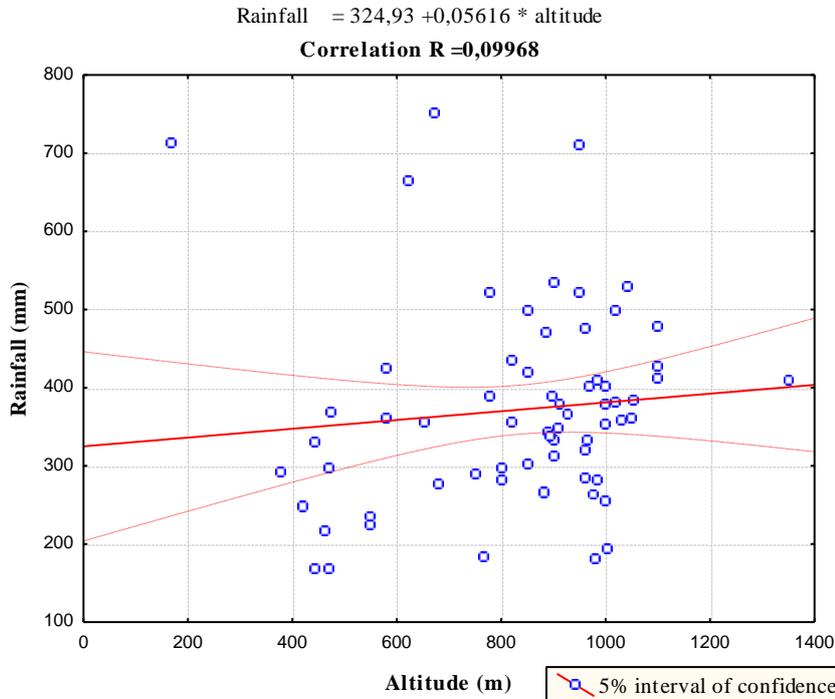


Figure 26. Corrélation entre les précipitations et l'altitude.

Selon le modèle MLR, 59,5% de la variabilité observée des précipitations est attribuée aux paramètres géographiques ($R^2 = 0,595$), ce qui laisse 40,5% de variance résiduelle attribuable à des complications non mesurées. La régression multiple dans ce cas donne une description plus précise de la répartition régionale des précipitations; il semble que l'intercepte ou la constante de la régression (-9159) ait un impact négatif important sur les précipitations annuelles. Ce résultat indique que les précipitations sont influencées par d'autres facteurs environnementaux tels que la distance de la mer, le mouvement de l'humidité de l'air, la couverture végétale, la température et la pression atmosphérique (Subyani, 2004; Zekai et Zeyad, 2000; Chua et Bras, 1982; Rosenberg, 1969). La variabilité spatiale des précipitations est clairement liée à un gradient Nord / Sud. Compte tenu de la position de la zone d'étude, située sur le côté sud de la chaîne de l'Atlas Tellien. La partie nord de cette région peut profiter beaucoup des pluies orographiques au contraire de la partie centrale et du sud (Miniscloux et al, 2001). Les températures élevées et les masses d'air sèches provenant du Sahara génèrent un front chaud qui joue le rôle de barrière contre le front froid venant du

nord. En outre, le manque de végétation dans la zone d'étude qui est dominée par des cultures annuelles comme le blé et l'orge contribuent à réduire les précipitations.

3.2 Précipitations mensuelles

3.2.1. Effet de la longitude

La figure (27) représente l'influence du facteur topographique longitude, par les valeurs de ces coefficients durant les 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 en dents de scie, indiquant que les valeurs coefficients de la longitude de l'équation de régression multiple ne suivent pas un comportement uniforme. Les coefficients du paramètre longitude varient au cours de l'année de façon aléatoire. Cependant, ces coefficients longitudinaux possèdent un signe positif, sauf le cas du 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, octobre et décembre, avec respectivement $0,03$, $0,11$ et $0,43$. La majorité des valeurs de ces coefficients est positive, cela montre que la longitude affecte positivement les précipitations mensuelles.

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 commence 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 $4,62$.

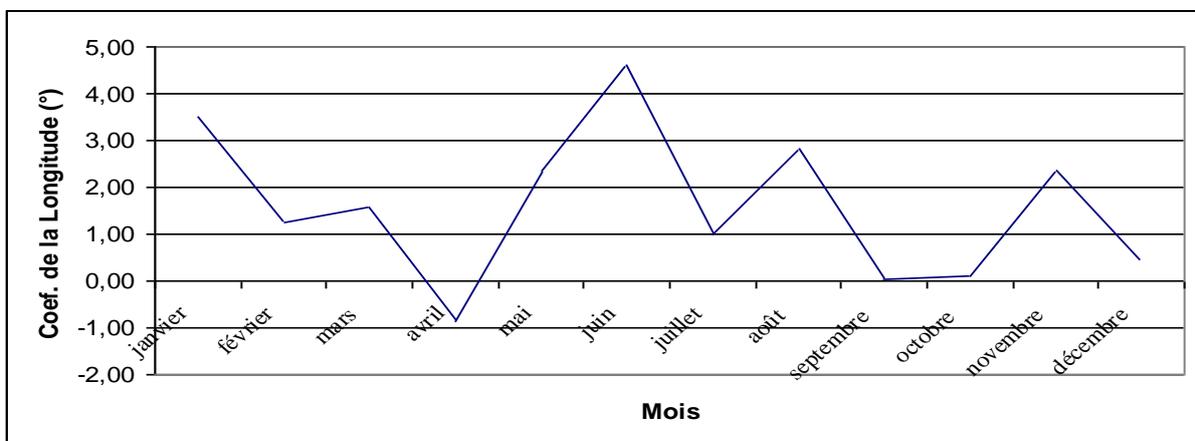


Figure 27. Comportement des coefficients de la longitude à l'échelle mensuelle

3.2.2. Effet de la latitude

A travers la figure 28, nous remarquons que l'effet du facteur géographique latitude diminue de janvier jusqu'à juillet et Août où les valeurs deviennent négatives. La courbe prend une autre allure par la suite elle devient ascendante et continue son allure jusqu'au mois de décembre où elle atteint la valeur la plus élevée (67,76).

L'effet de la latitude est peu marqué pour les mois d'automne, bien que l'effet de ce facteur soit important pour les mois d'hiver à savoir décembre (67,76), janvier (46,42) et février (44,04). Les résultats obtenus montrent qu'il existe une relation proportionnelle de coefficient de la latitude et les cumuls pluviométriques.

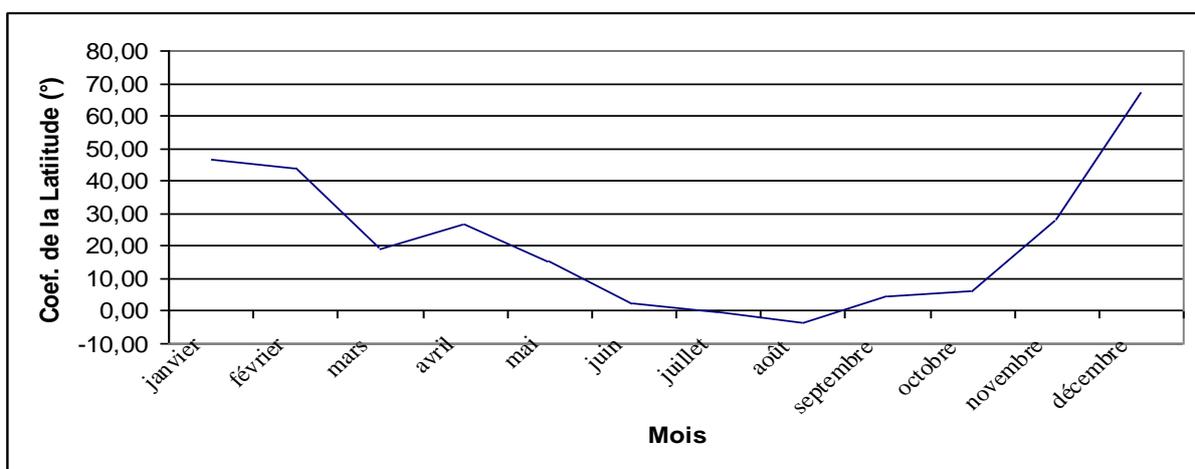


Figure 28. Comportement des coefficients de la latitude à l'échelle mensuelle

3.2.3. Effet de l'altitude

La figure 29 montre la courbe représentative de coefficients de l'altitude à l'échelle mensuelle qui dénote d'un comportement irrégulier. Les valeurs des coefficients de l'altitude. Celles-ci sont très basses par rapport aux deux autres coefficients de paramètre géographique, la longitude et de latitude. Ces coefficients varient entre $-6,2 \cdot 10^{-3}$ et $17,9 \cdot 10^{-3}$.

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.

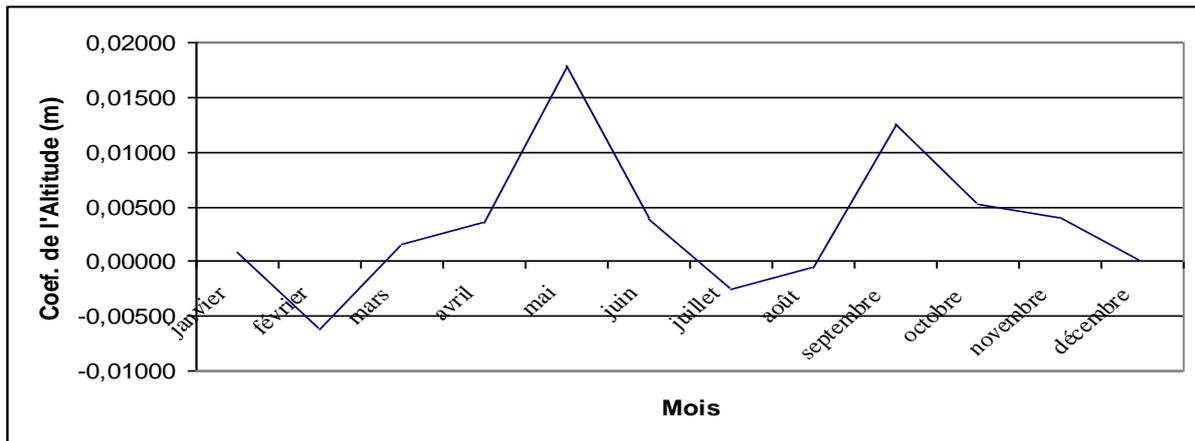


Figure 29. Comportement des coefficients de l'altitude à l'échelle mensuelle

3.2.4. Effet de la constante

L'allure de la courbe de comportement de la constante de l'équation de régression linéaire multiple qui est un coefficient qui englobe l'effet de l'ensemble des facteurs du milieu non pris en charge comme facteur à étudier dans l'équation est représentée par la figure 30. La plupart des valeurs de la constante sont très faibles et inférieures à zéro, sauf pour les valeurs du mois de juillet et du mois d'août qui sont des valeurs positives avec les valeurs respectives de 17,92 et 116,09. La constante a des effets inversement proportionnels faisant augmenter la quantité des pluies précipitées dans l'espace étudié chaque fois que sa valeur tend vers les valeurs les plus négatives.

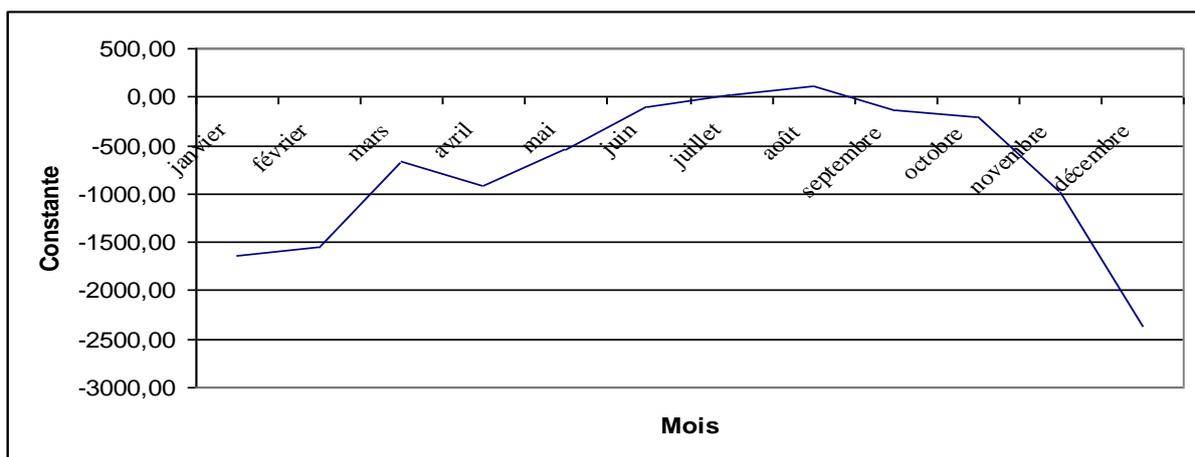


Figure 30 : Comportement des constantes à l'échelle mensuelle

3.2.5. Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation théorique R_a des différentes équations explicatives du paramètre précipitation est considéré comme la valeur critique du coefficient de corrélation, à

la probabilité $\alpha = 5\%$. Dans notre étude il est de $R_\alpha = 0,274$ selon la table de de Snedecor (Dagnelie, 1973). Les coefficients de corrélations sont significatifs sauf pour le mois de juillet. Nous avons réalisé la courbe du comportement des coefficients de corrélations mensuels. Ce graphique nous permet de voir nettement les mois pour lesquels les équations de la régression multiple sont explicatives le plus (figure 31). La courbe indique que la majorité des mois ; sauf les mois juillet, août, septembre et octobre, la variation des précipitations est considérablement expliquée par les paramètres topographiques longitude, latitude et altitude.

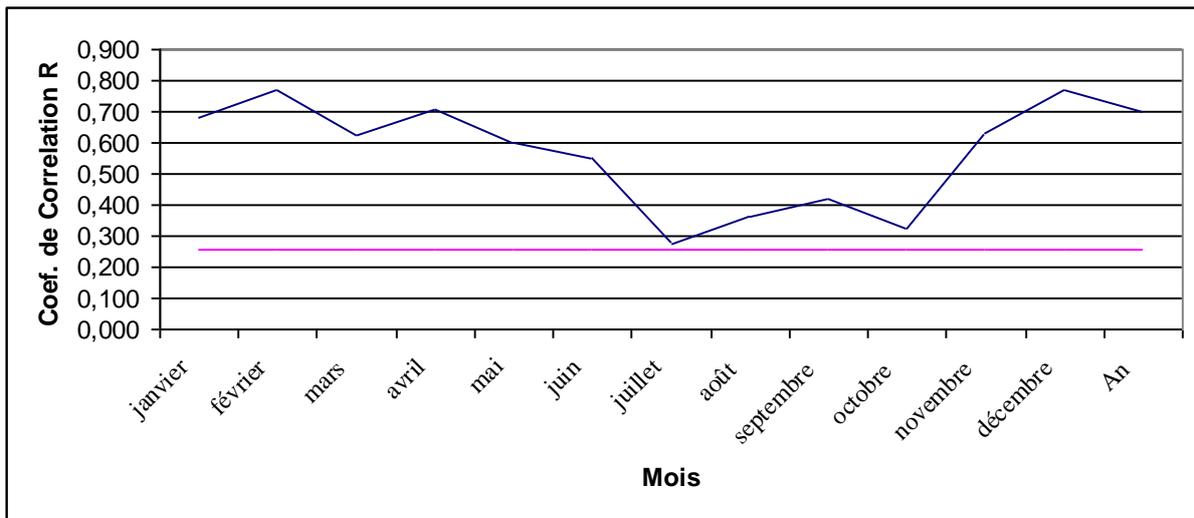


Figure 31. Courbe des coefficients de corrélation de la régression multiple à l'échelle mensuelle

4. Cartographie numérique des précipitations

4.1. Précipitation annuelles

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 – 2007).

La cartographie numérique des précipitations, à l'échelle annuelle et mensuelle, est basée sur l'approche géostatistique. Après avoir déterminé le gradient des pluies par l'équation de régression multiple, il a été nécessaire d'estimer les pluies à travers l'espace de la région d'étude.

4.1.1. Variographie et interpolation

La réalisation des variogrammes directionnels à partir des données sur les précipitations, selon les directions Nord-Sud et Est-Ouest, a permis d'identifier la structure de la pluviométrie. Les figures 32 et 33 illustrent la structure des variogrammes directionnels. Les résultats ont révélé que ces variogrammes s'ajustent bien avec le variogramme théorique

de type puissance ($IGF = 1,44 \cdot 10^{-3}$) et le variogramme théorique de type gaussien ($IGF = 4,98 \cdot 10^{-2}$) respectivement suivant dans ces deux directions Nord-Sud et Est-Ouest.

Le tableau 12 énumère les paramètres du variogramme et les tests de validations.

Tableau 12. Variogrammes théoriques et tests de validations.

Variogramme		Variogramme théorique (Model)			
Paramètres	Modèle	Effet de pépite	Sill/ puissance	portée/pente (Km)	IGF (Best fit found)
Pluie annuelle selon la direction Nord/Sud (0°).	Puissance Linéaire	1280	8200	171	$1,44 \cdot 10^{-3}$
Pluie annuelle selon la direction Est/Ouest (90°).	Gaussian	4500	17500	100	$4,98 \cdot 10^{-2}$

La structure linéaire du variogramme de type puissance selon la direction Nord-Sud indique l'existence d'une dérive. Ainsi, les précipitations varient plus rapidement vers la direction Nord-Sud. En outre, les variogrammes montrent l'existence d'une gamme croissante de fluctuations limitées aux distances de 171 et 100 km respectivement (tableau 17). L'effet de pépite dénote d'une existence de fluctuations rapides indétectables par le réseau climatique mis en place. Le variogramme gaussien avec effet de pépite plus élevé indique l'existence d'un microclimat dans la région (Slimani et al, 2007).

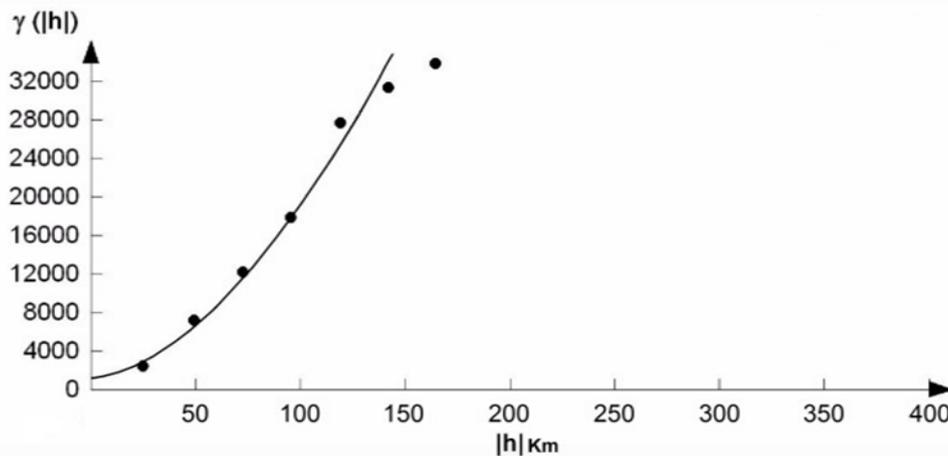


Figure 32. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes annuelles selon la direction Nord-Sud

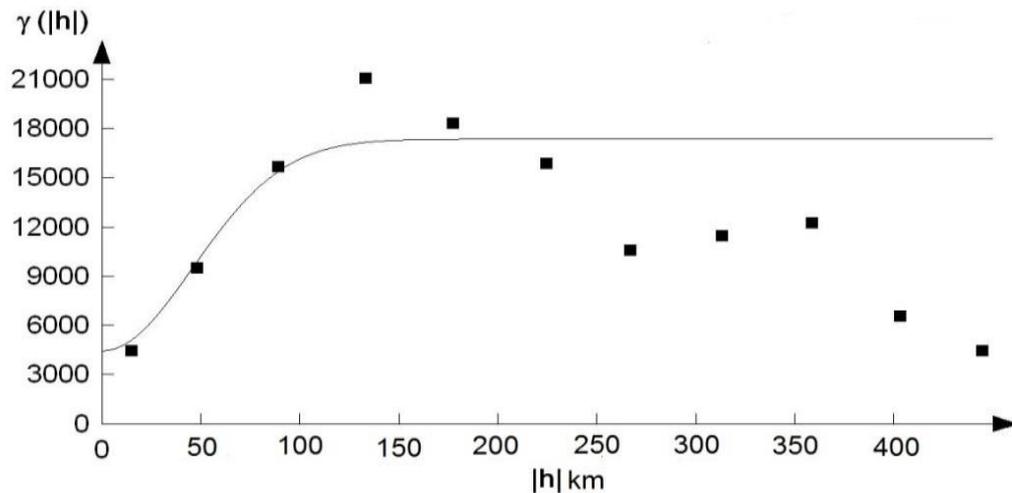


Figure 33. Variogramme théorique ajusté aux pluies moyennes annuelles selon la direction Est-Ouest.

Une interpolation par krigeage ordinaire a été appliquée pour les données de précipitation afin d'effectuer une cartographie des pluies de la région d'étude. La figure 34 montre la répartition des précipitations à travers la région d'étude. Une répartition verticale des précipitations et l'effet de contraste nord / sud sont apparents sur la figure. Les isohyètes sont généralement organisées parallèlement aux barrières orographiques du Nord. L'organisation horizontale des chaînes de montagnes délimitant la partie nord de la zone d'étude aboutit à une interception en amont des perturbations climatiques provenant du Nord.

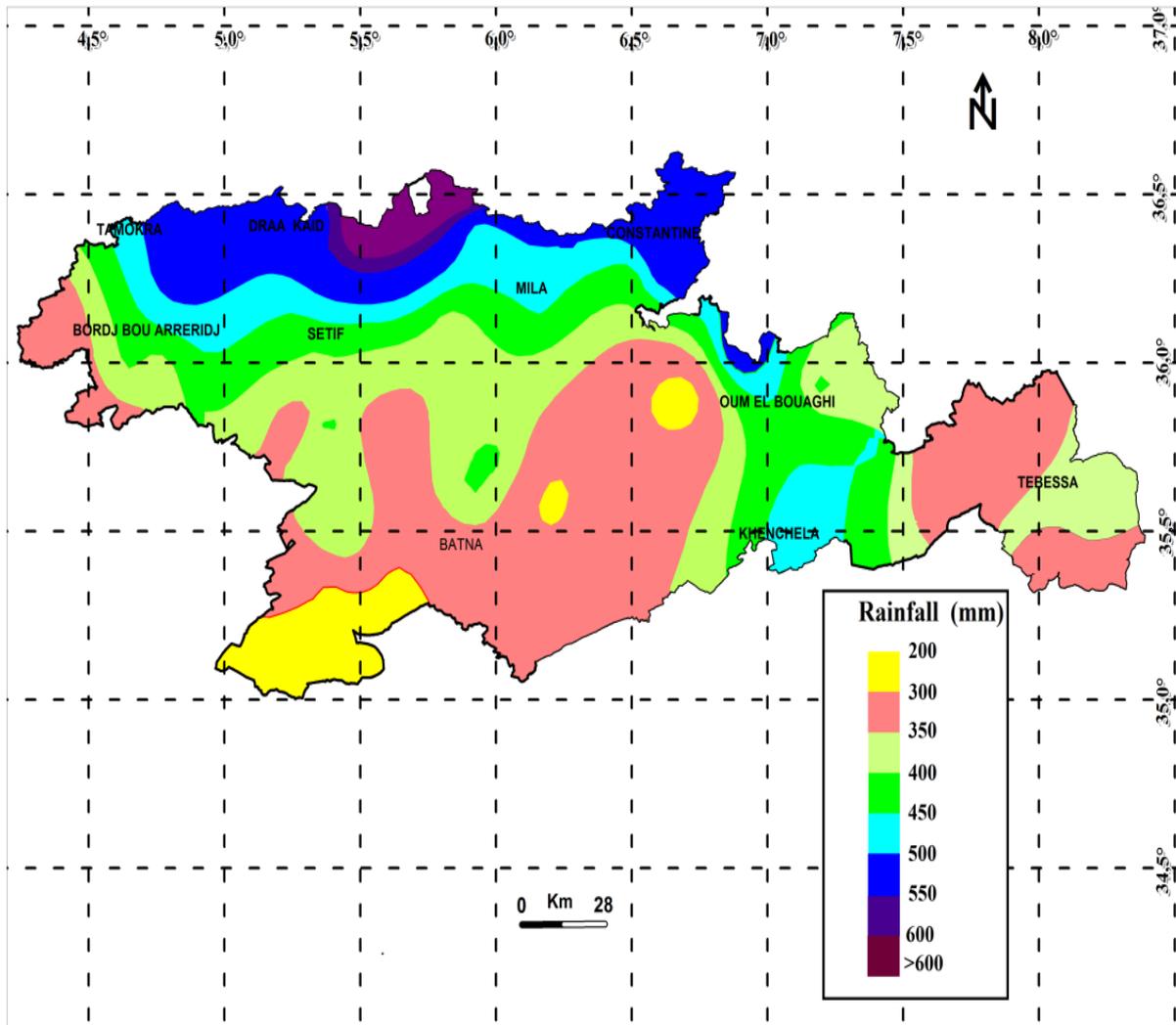


Figure 34. Carte de répartition spatio-temporelle des précipitations annuelles (période 1986-2007)

Ainsi, les bandes de pluie supérieures à 500 mm occupent la partie nord de la région, ce qui représente 12,41%, en conséquent 10% de la superficie totale d'étude est affecté par la bande de pluie allant de 500 à 550 mm. Dans la partie centrale de la zone d'étude, les isohyètes suivent un gradient nord/sud clair causé par des masses d'air chaudes et sèches provenant du sud soulignées pendant les mois de sirocco. Les bandes de pluie couvrant les isohyètes de 300 à 400 mm dominent 58% de la zone d'étude, suivies de la bande de pluie de 400 à 500 mm (24,31%). Dans la région de l'Est de la zone d'étude, les bandes de pluie adoptent un gradient Est-Ouest. Cela pourrait être dû à des masses humides d'écoulement d'air provenant de la Méditerranée à travers la Tunisie, favorisant ainsi les précipitations aux limites de la frontière tunisienne. En outre, les poches de pluie circulaires qui apparaissent dans la partie centrale de la région confirment la présence d'un microclimat, comme en témoigne la plus grande valeur d'effet de pépite détectée (tableau 12).

Les bandes de pluie allant de 200 à 350 mm couvrent 39,25% de la superficie. Les aires céréalières qui se trouvent dans cette zone devraient être consacrées exclusivement à la culture de l'orge et avec des apports d'irrigation de complément pour les zones avec des précipitations annuelles inférieures à 300 mm. Par ailleurs, les bandes de pluie allant de 350 à 500 mm occupent 48,32% de la zone. Les aires céréalières qui se trouvent dans cette zone conviennent à la culture du blé dur avec une irrigation supplémentaire pour les zones dont la quantité de pluie annuelle est inférieure à 450 mm. Les bandes de pluie supérieures à 500 mm sont plus favorables à la culture du blé tendre (*Triticum aestivum*).

4.1.2. Détection des erreurs du réseau

Tenant compte des standards d'installation des stations météorologiques avec une couverture de 20 à 40 Km² en plaines et approximativement 2 Km² en zones de reliefs (Bertrand-Krajewski et al, 2000), 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. Aussi la région d'étude est servie d'une manière hétérogène par des stations météorologiques. Une cartographie par krigeage des erreurs est mise en place pour déterminer cette anomalie de répartition et son impact sur l'estimation des pluies annuelles. Le variogramme directionnel des résidus de pluies est représenté dans la figure 35.

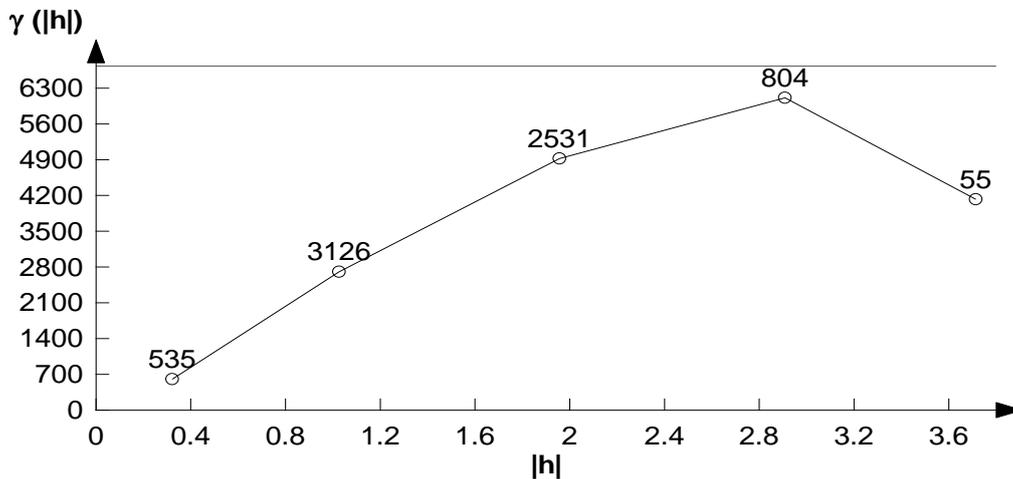


Figure 35 : Variogramme directionnel des résidus des précipitations annuelles

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 -40 (Figure 36). Par ailleurs, les valeurs des isolignes les plus élevées (supérieurs à 50) sont comprises entre la latitude 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 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.

Nous pouvons dire que les courbes iso-valeurs des résidus suivent aussi un comportement de variation Nord-Sud.

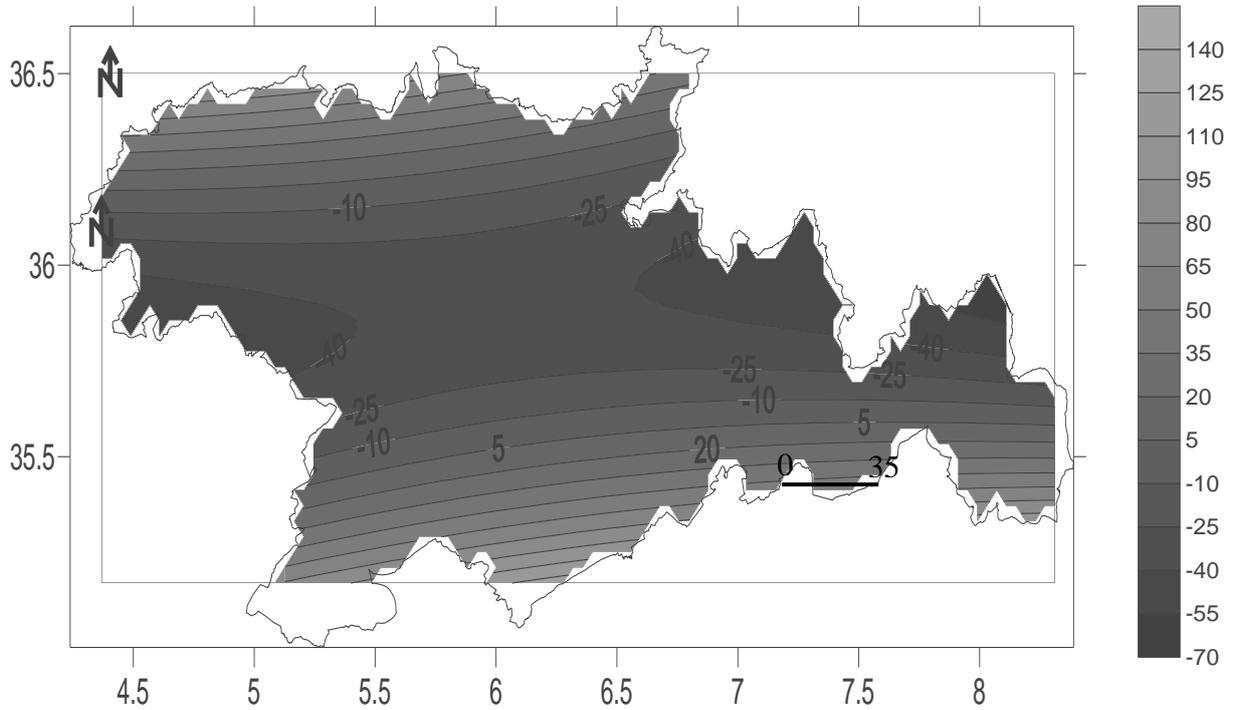


Figure 36. Carte des résidus de précipitations annuelles

Afin de remédier à cette situation, il est préconisé d'installer de nouvelles stations météorologiques et remettre en marche celles existantes mises à l'arrêt. Si nous prenons un maillage serré de 15 km, la région doit disposer de 155 points (Figure 37) ; chose qui est financièrement très coûteuse et non économique.

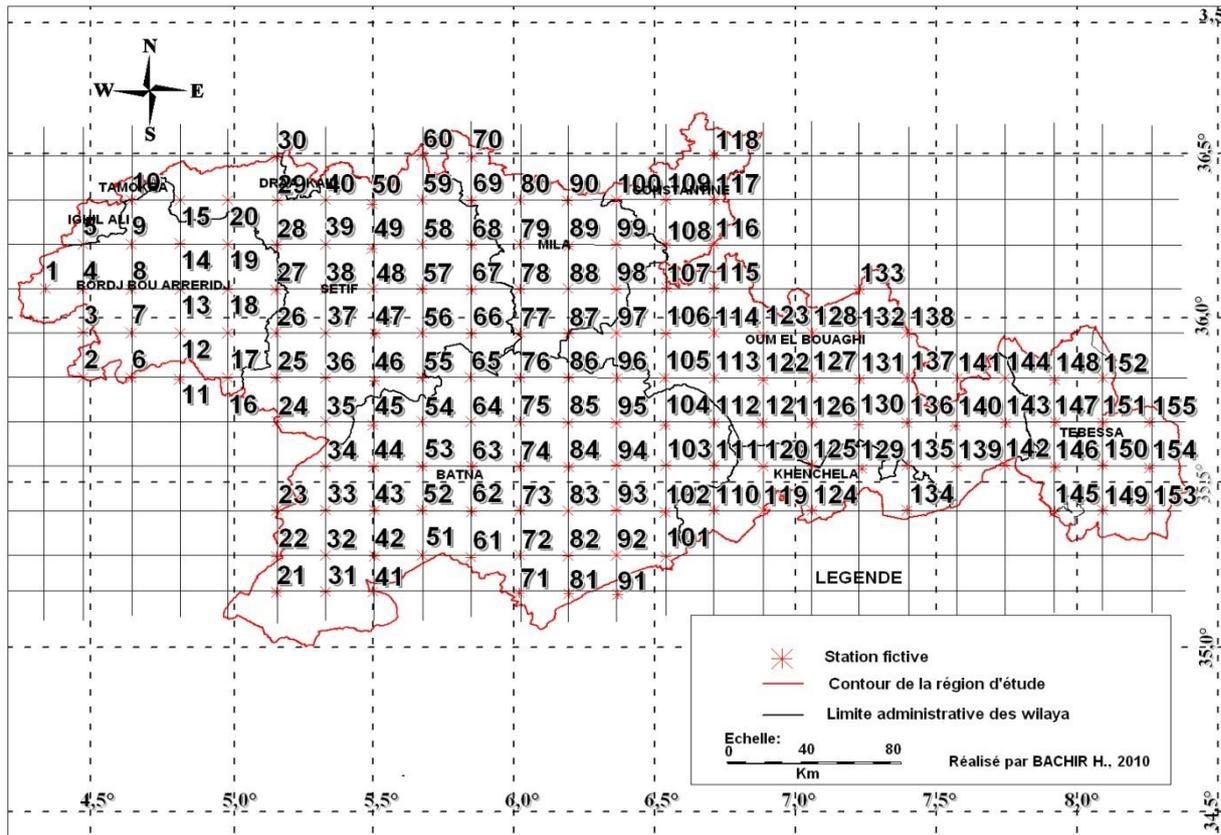


Figure 37. Répartition idéale en station pluviométrique maillage carré serré (15Km²)

Par contre, si nous considérons un maillage de 30km, la région doit disposer d'environ 103 stations pluviométriques réparties à travers la région. Donc, un supplément de 43 autres stations peut suffire pour une meilleure représentativité. Le travail recherché a fait ressortir en premier lieu 95 stations appartenant aux deux institutions ONM et ANRH. Nous pouvons souligner que la région est bien équipée mais, il faut réfléchir à maintenir une certaine stabilité de marche des stations pour éviter les lacunes dans les séries de données climatiques.

4.2 Précipitations mensuelles

Nous avons réalisé des cartes de répartitions de précipitations à travers la région d'étude pour déterminer où le stress hydrique peut survenir à l'échelle mensuelle. Quatre mois sont ciblés à savoir le mois de février, mars, avril et mai. Ces derniers sont considérés comme des mois qui coïncident avec les stades phénologiques les plus critiques dans le développement végétatif des céréales dans la région d'études (Bachir, 2010).

Les figures 38 et 39 représentent les variogrammes directionnels des précipitations du mois de février selon les deux directions Nord-Sud et Est-Ouest.

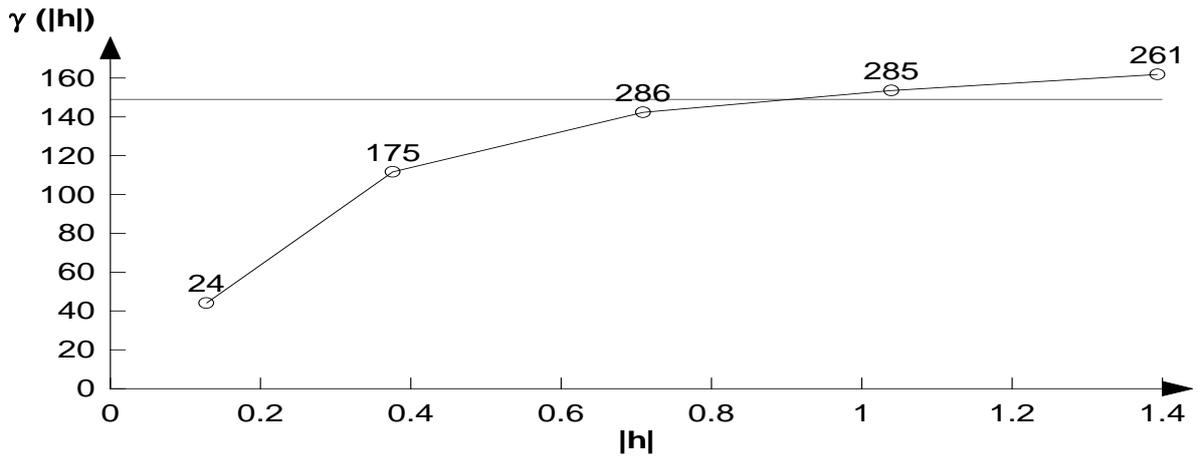


Figure 38. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de février selon la direction Nord-Sud.

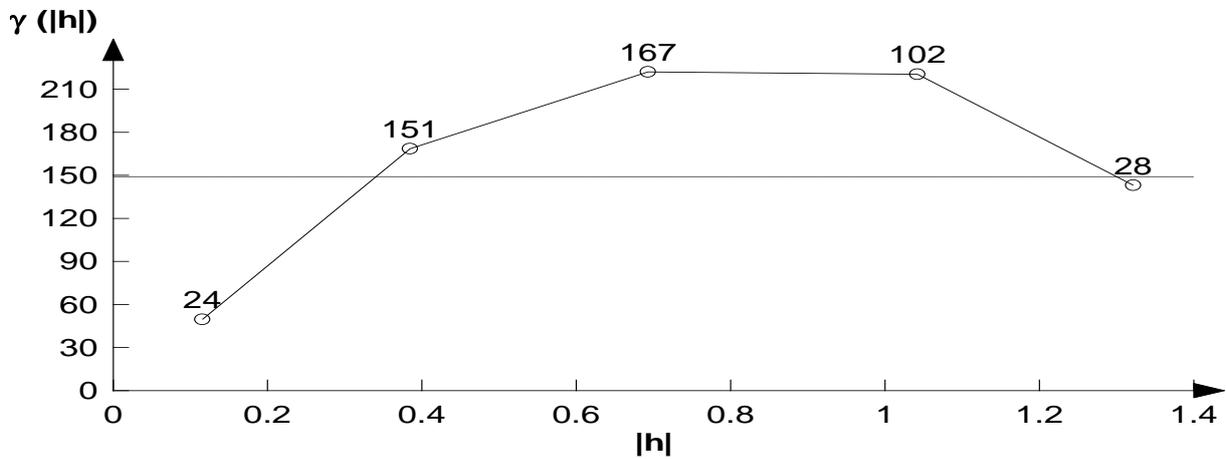


Figure 39. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de février selon la direction Est-Ouest.

La figure 40 illustre la situation de répartition des pluies à travers la région. Elle montre que la partie nord est bien pluvieuse en mois de février. Les pluies dans cette partie de la région d'étude peuvent atteindre 80 mm. Dans la partie centrale une bande importante est couverte par des isohyètes qui varient entre 5 et 20 mm. La partie sud de la région d'étude est caractérisée par une sécheresse où les pluies ne dépassent pas les 5 mm de cumuls. A cette période de l'année les températures commencent à augmenter et la taille des plantes commence à prendre du volume. C'est le début de la période des besoins en eau pour le développement du végétal.

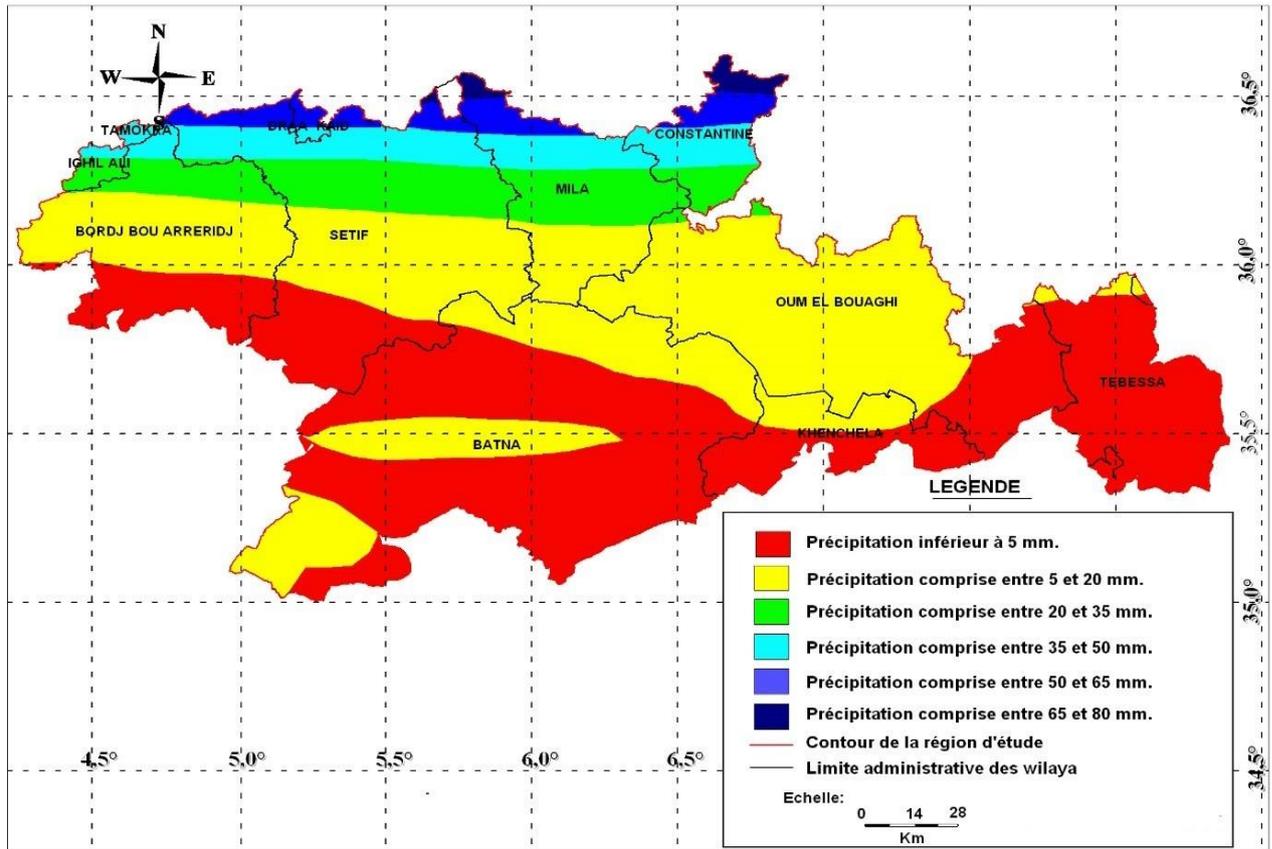


Figure 40 : Répartition des précipitations du mois de février de la région d'étude

Les figures 41 et 42 représentent les variogrammes directionnels des précipitations selon les deux directions Nord-Sud et Est-Ouest.

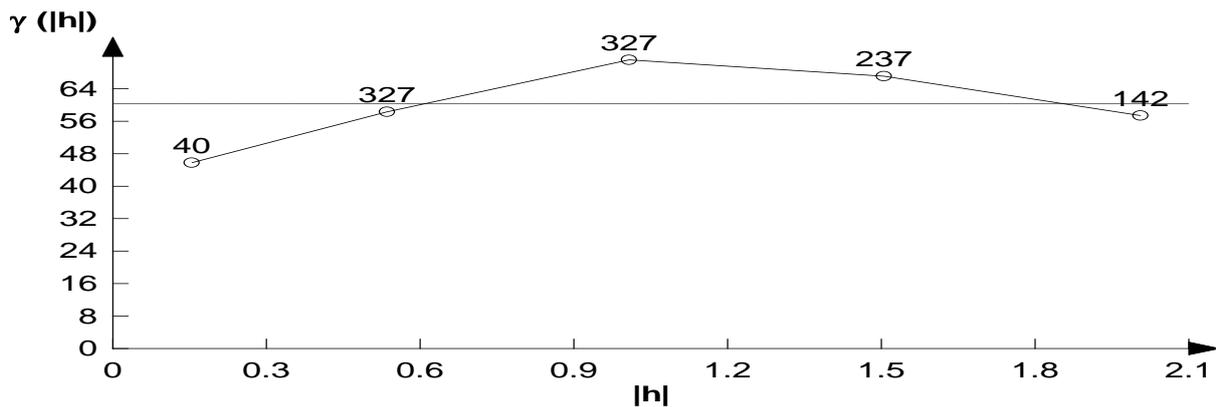


Figure 41. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de mars selon la direction Est-Ouest

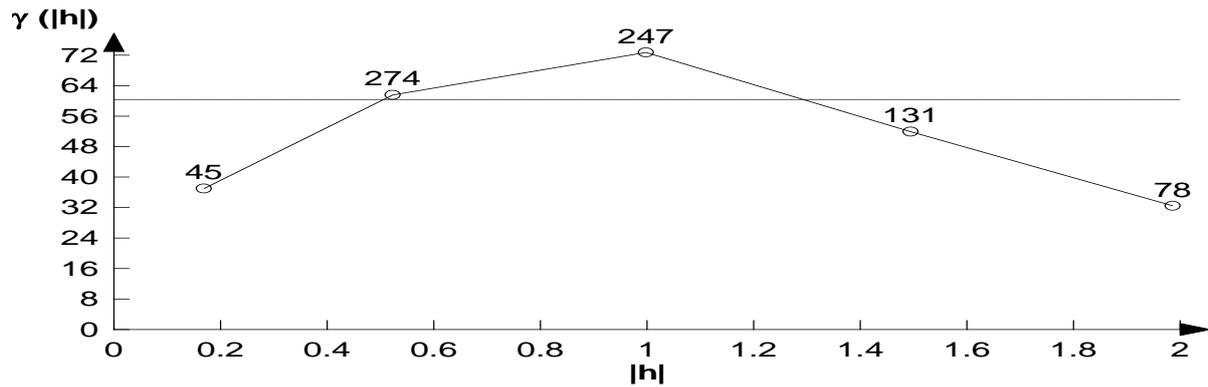


Figure 42. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de mars selon la direction Est-Ouest

La figure 43 montre qu'il existe deux plages de précipitations dominantes en ce mois de l'année, à savoir la plage comprise entre les isohyètes 5 mm à 20 mm et la plage dont les isohyètes sont comprises 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 phénologiques 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 se 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 des blés auront leurs doses de pluies.

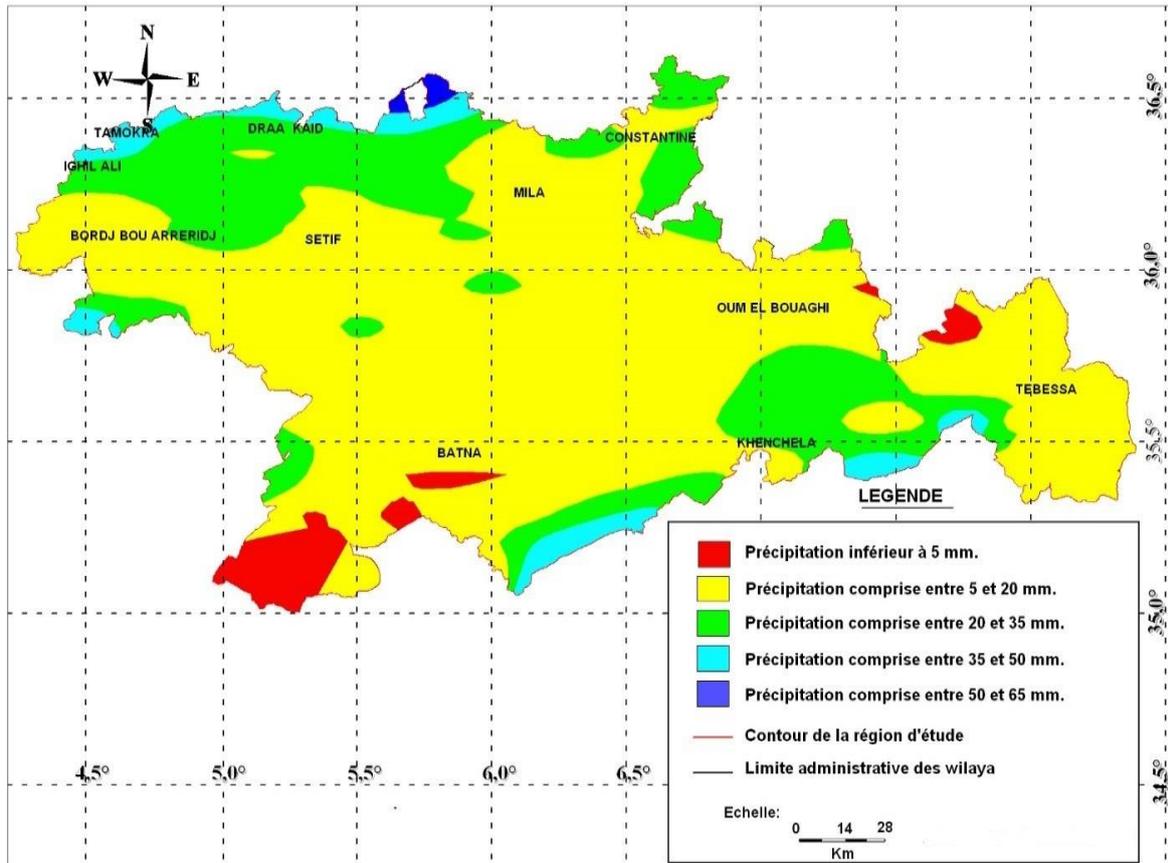


Figure 43 : Répartition des précipitations du mois de mars de la région d'étude

Les figures 44 et 45 représentent les variogrammes directionnels des précipitations selon les deux directions Nord-Sud et Est-Ouest.

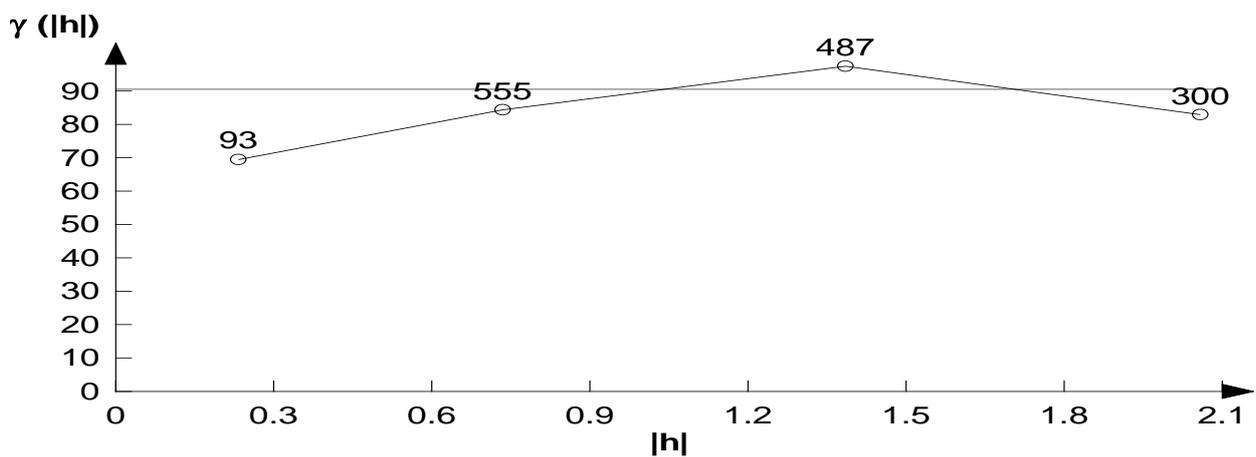


Figure 44. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois d'avril selon la direction Est-Ouest

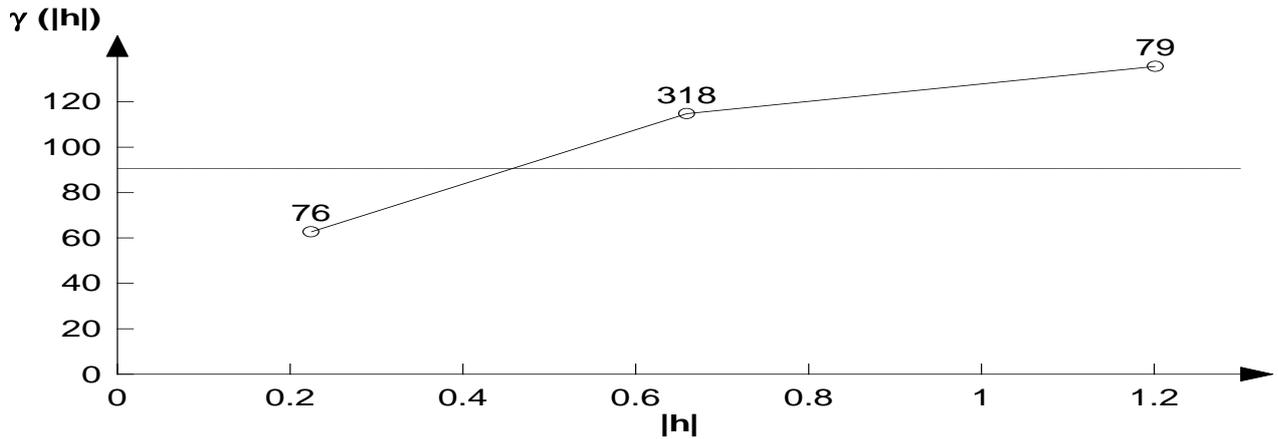


Figure 45. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois d'avril selon la direction Est-Ouest

La figure 46 montre qu'au Nord de région d'étude les isohyètes supérieures à 35 mm touchent une bande un peu plus large par rapport au mois de mars. En effet, ces isohyète touchent aussi une bonne partie de la wilaya de Constantine et les parties Nord des wilayas de Sétif et de Mila. Cette situation n'est pas généralisée sur toute la région car la partie centrale est couverte par des plages de pluie qui ne dépassent pas les 25 mm.

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 ré-humectation du sol à cette époque permet une meilleure fécondation.

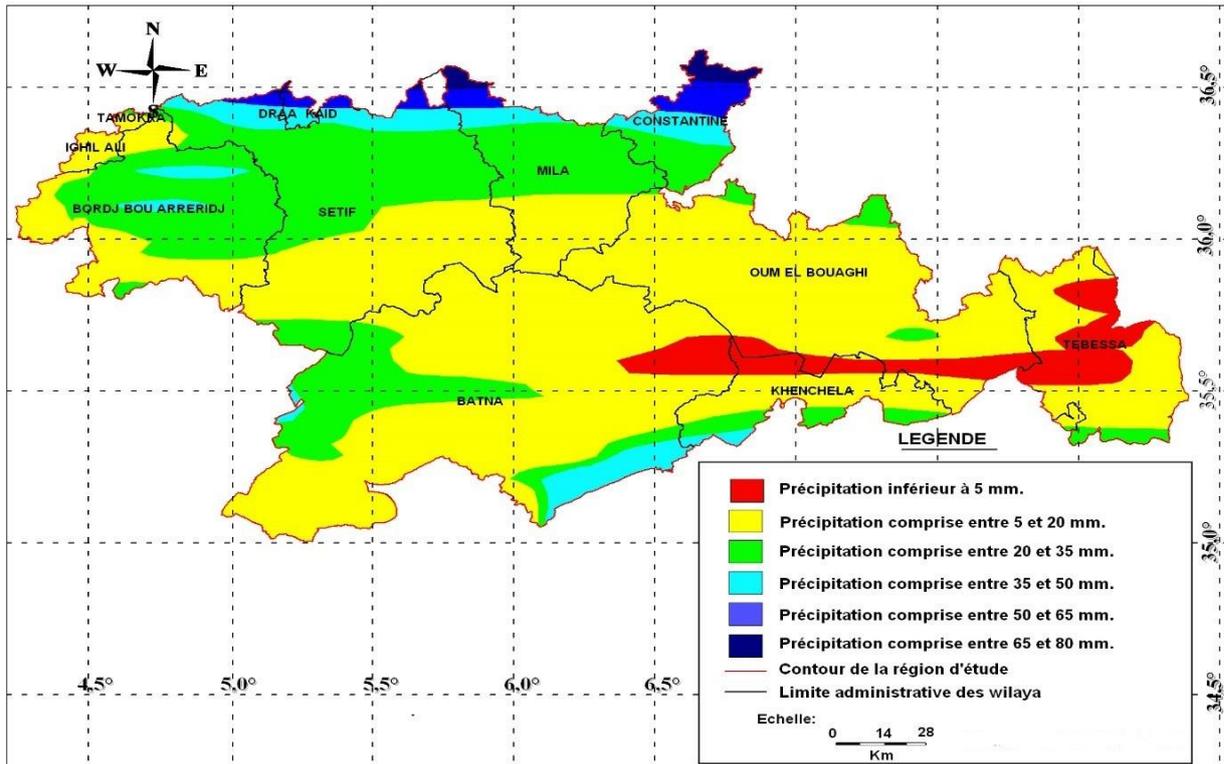


Figure 46. Répartition des précipitations du mois d’avril de la région d’étude

Les figures 47 et 48 représentent les variogrammes directionnels des précipitations selon les deux directions Nord-Sud et Est-Ouest.

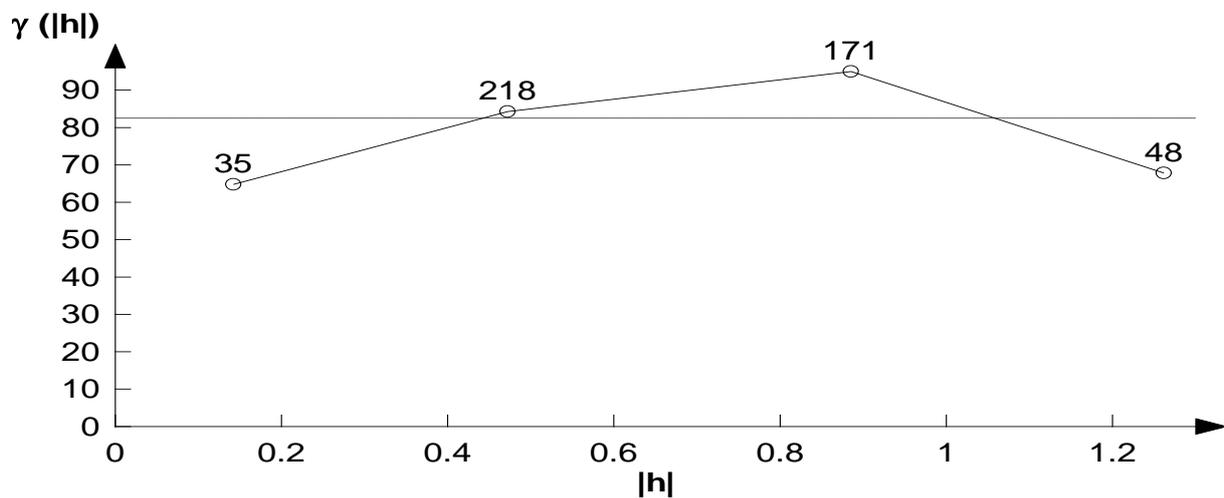


Figure 47. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de mai selon la direction Est-Ouest

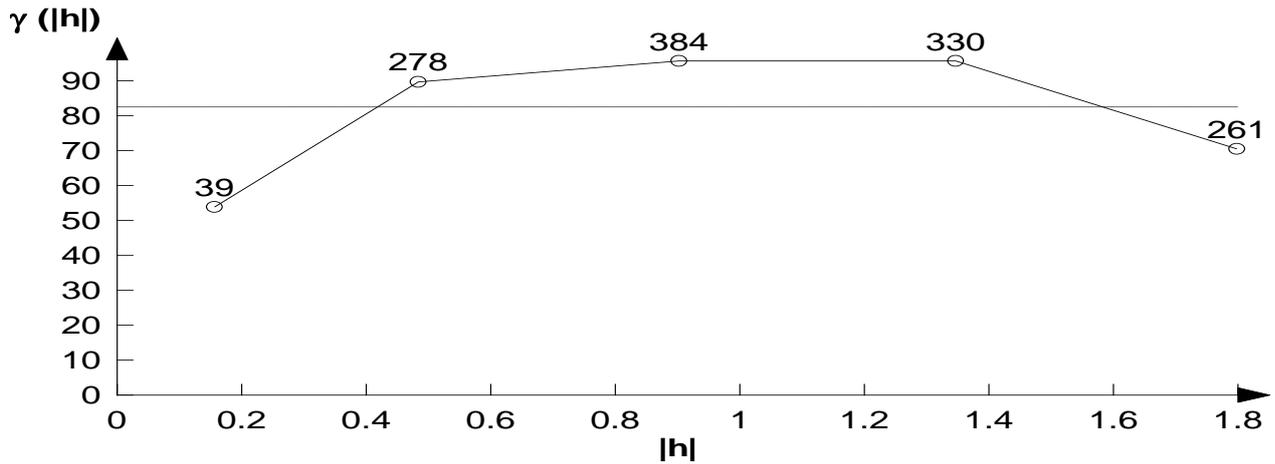


Figure 48. Variogramme théorique ajusté des pluies moyennes du mois de mai selon la direction Est-Ouest

La figure 49 illustre qu'en mois de mai, les isohyètes 20 mm à 35 mm couvrent l'intégralité de la partie nord de la région d'étude. La partie sud de la wilaya de Bordj Bou Arreridj bénéficie d'une pluviométrie mensuelle supérieure 35 mm. Par ailleurs, les parties Sud des wilayas de Batna et Khenchela sont couvertes par des isohyètes comprises entre 5 et 20 mm. Les stades phénologiques des blés ensemencés durant octobre et novembre coïncident avec la fin du stade épiaison et floraison à remplissage du grain au mois de mai. A cette période, les besoins en eau du blé sont à leurs extrêmes, compte tenu de la demande climatique qui devient importante et la demande en eau pour les besoins de remplissage des grains de blé. A cet effet, les besoins en eau des cultures mises 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.

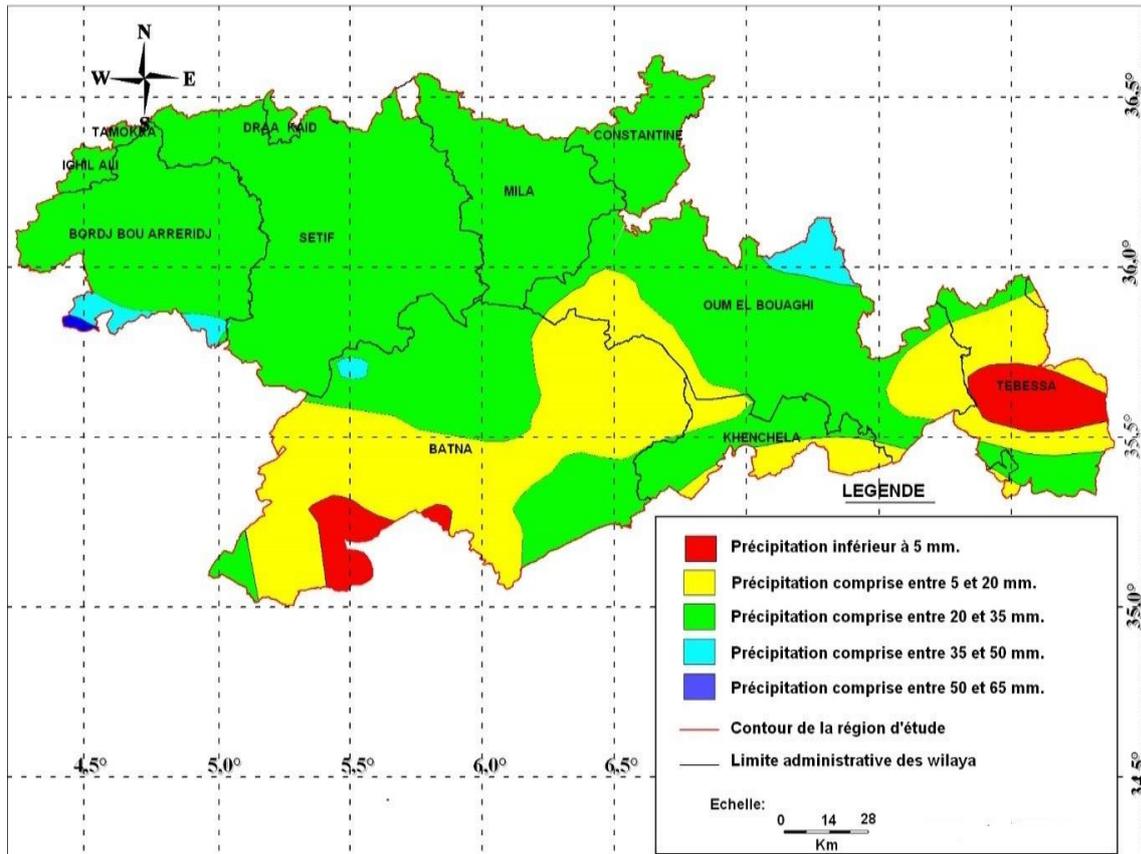


Figure 49. Répartition des précipitations du mois de mai de la région d'étude

4.3. Les gelées

4.3.1. Les gelées annuelles

La figure 50 montre le nombre de jours de gelées par an selon les trois fréquences choisies, minimales, moyennes et maximales. D'après cette figure, 15 stations enregistrent des gelées supérieures à 60 j/an et 18 stations enregistrent des gelées supérieures à 40 j/an. Pour les gelées minimales, sauf pour la station de Megres, l'ensemble des stations enregistrent des gelées inférieures à 40 j/an. Par ailleurs, les gelées moyennes annuelles sont variables d'une station à une autre.

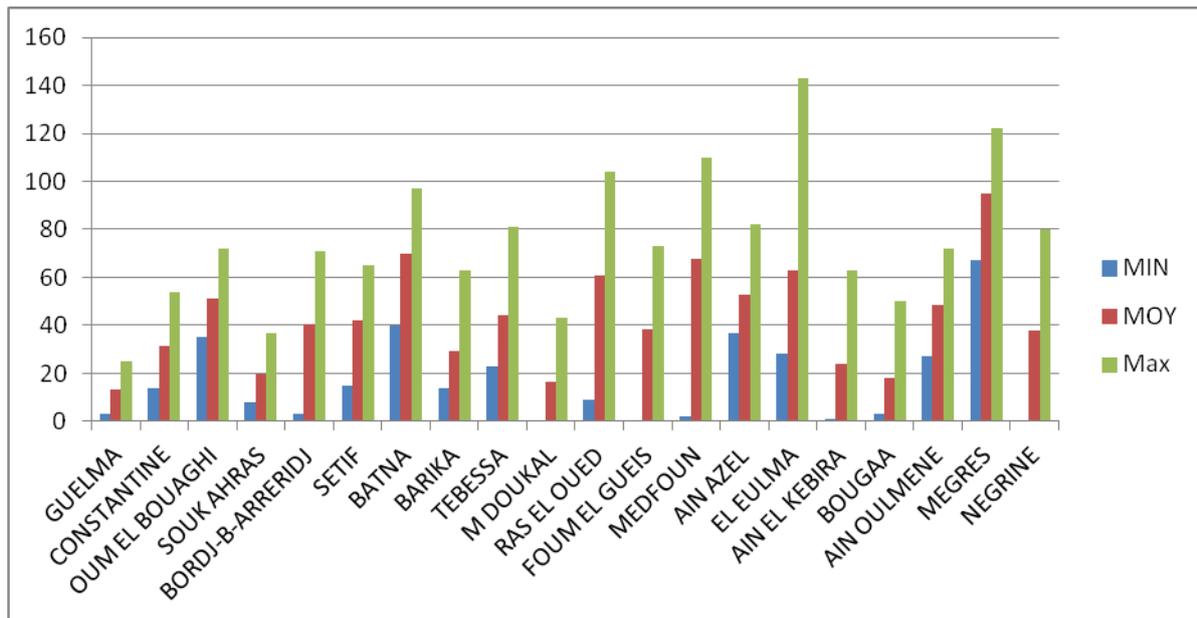


Figure 50. Gelées minimales, moyennes et maximales

4.3.2. Cartographie de la répartition spatiotemporelle des gelées annuelles

Les cultures de céréales souffrent du froid hivernal et printanier, chose qui affecte sérieusement sur les rendements des céréales. Le degré d'influence sur les rendements est en rapport avec la fréquence des gelées. Afin de mettre en évidence les fréquences et la répartition des couloirs gélifères dans la région d'étude, nous avons cartographié ce paramètre par rapport à sa répartition dans l'espace et dans le temps. Cette répartition est caractérisée par rapport aux fréquences maximales et moyennes des gelées.

La figure 51, représente la répartition spatio-temporelle des gelées moyennes annuelles à travers le territoire étudié. Cette figure montre que la plus grande partie de la région est touchée par les gelées dont la fréquence est supérieure à 40j/an. La partie nord de la région plus exactement le Nord de la wilaya de Sétif est touchée par des gelées dont la fréquence est comprise entre 60 et 100 j/an. La majorité de la partie nord de la région est affectée par des gelées modérées dont la fréquence ne dépasse pas 40j/an. Cette répartition au nord de la région est favorable aux céréales d'hiver.

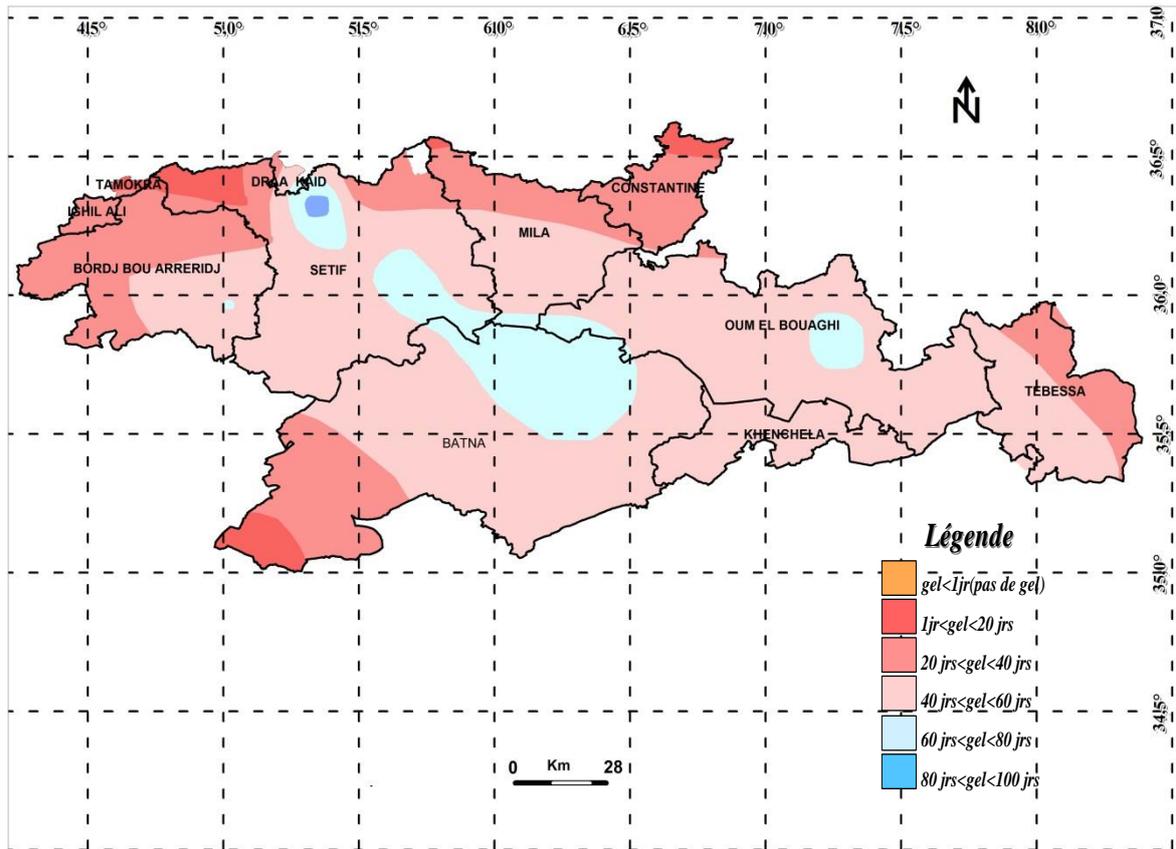


Figure 51. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes annuelles.

La figure 52 représente la répartition spatio-temporelle des gelées maximales annuelles à travers le territoire étudié. Cette figure montre que la majorité de la région d'étude est située dans une zone où les gelées sont supérieures à 60 j/an. Une partie importante de la wilaya de Sétif est touchée par de fortes gelées avec une fréquence qui dépasse 140 j/an. La majorité de la wilaya de Batna et la partie Est de la wilaya d'Oum El Bouaghi sont affectées par des gelées comprises entre 80 et 100 j/an. Cette situation, nous a conduit à réaliser des carte de gelée des mois où les blés sont plus sensibles à ce phénomène.

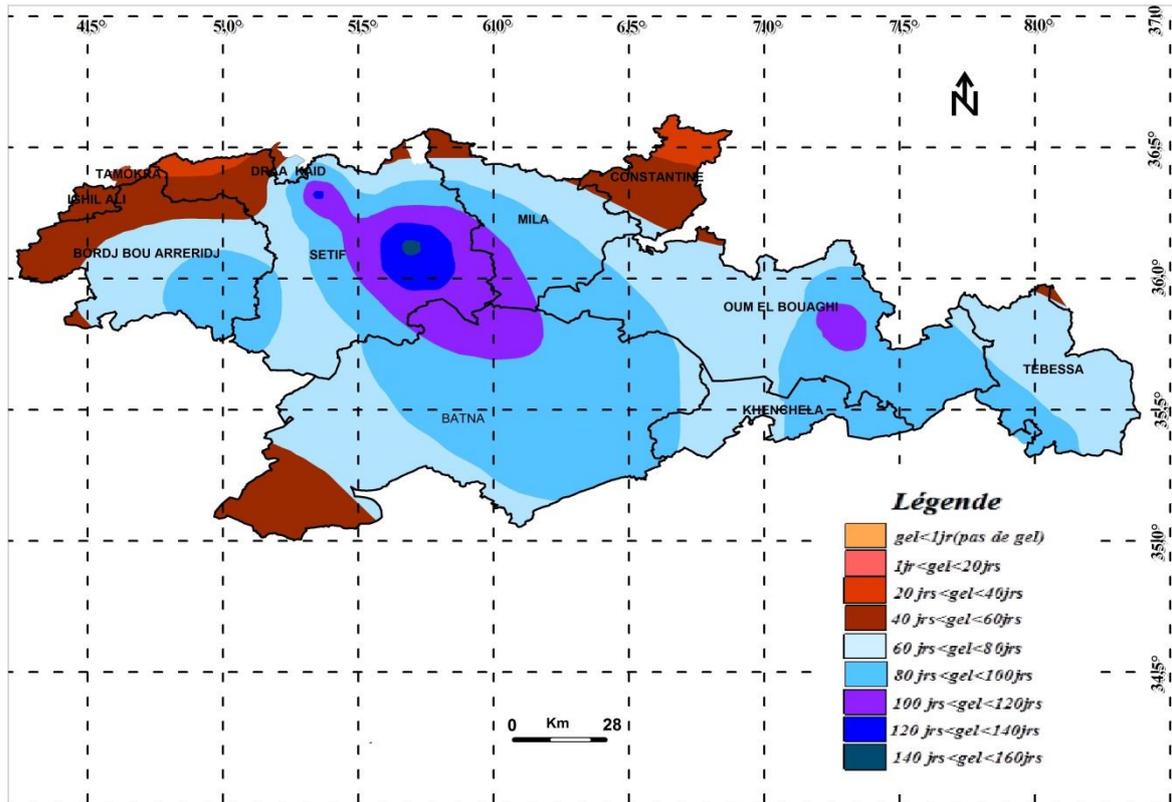


Figure 52. Répartition spatio-temporelle gelées maximales annuelles

4.3.3. Les gelées mensuelles

Comme nous l'avons présenté dans la partie bibliographique, les blés sont sensibles aux gelées hivernales lorsqu'ils sont semés tardivement. Des accidents peuvent survenir durant les mois d'hiver si la plante est très jeune et peuvent aussi survenir au printemps et causer des dégâts. Dans cette optique, nous avons préféré focaliser notre travail sur 4 mois à savoir, les mois de janvier, février, mars et avril.

4.3.3.1. Cartographie de la répartition spatiotemporelle des gelées mensuelles

Les figures 53, 54, 55, 56 montrent la répartition spatio-temporelle des gelées moyennes à travers le territoire étudié, respectivement pour les mois de janvier, février, mars et avril. Nous pouvons remarquer d'après la figure 53 que la partie centrale de de région est couverte par des gelées comprises entre 15 et 20 jours, par contre la partie nord couverte par des gelées inférieures à 5 jours. Selon la figure 54, les gelées sont moins accentuées qu'en mois de janvier dans la partie centrale de la région, elles sont comprises entre 10 à 15 jours. La partie nord, en majorité, elle est couverte par des gelées inférieures à 5 jours.

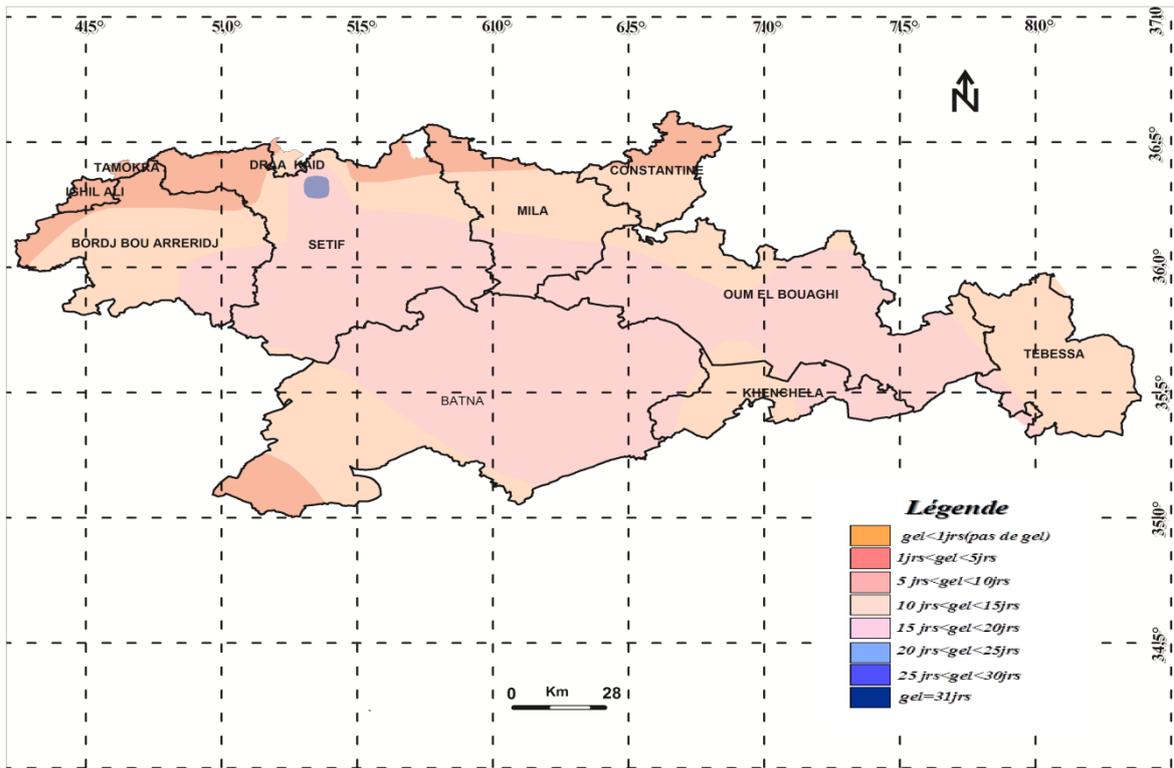


Figure 53. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de janvier

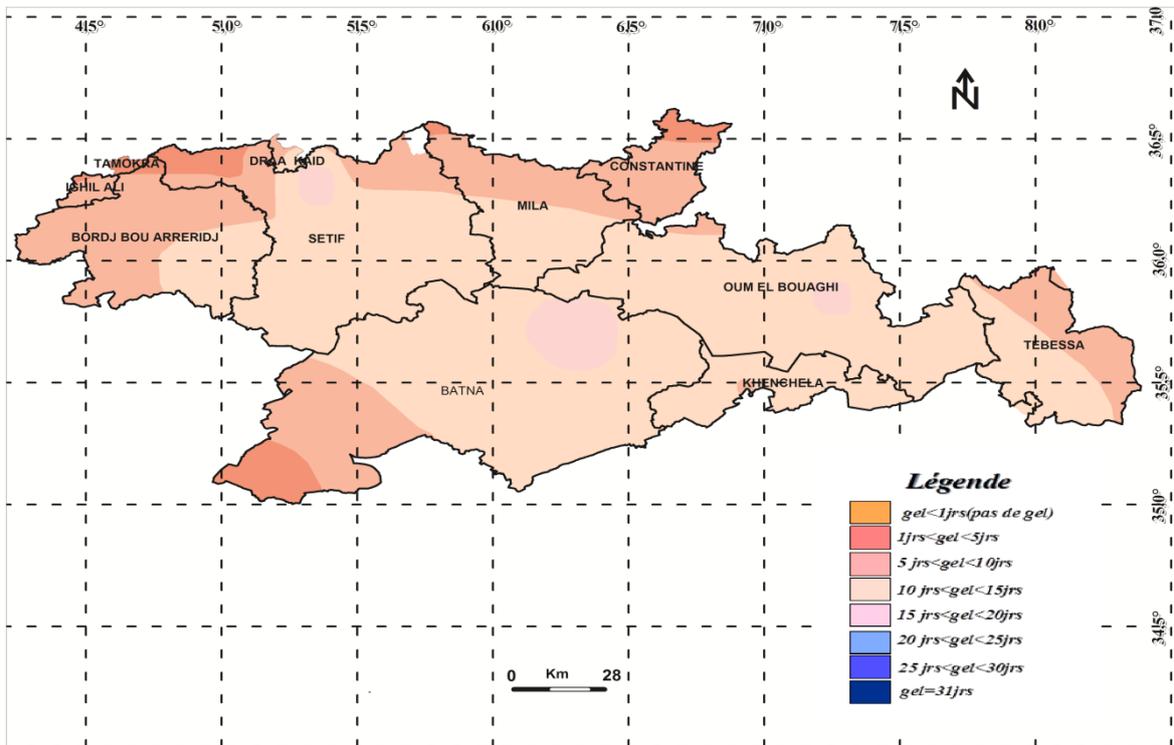


Figure 54. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de février

Concernant le mois de mars (figure 55), les gelées comprises entre 5 et 10 jours couvrent la partie centrale de la région. La partie restante est couverte par une plage de gelées inférieure à 5 jours. En avril, nous pouvons dire que la région ne souffre pas de problème de

gel. La figure 56 montre que la majorité de la région d'étude est affectée par des gelées inférieures à 5 jours.

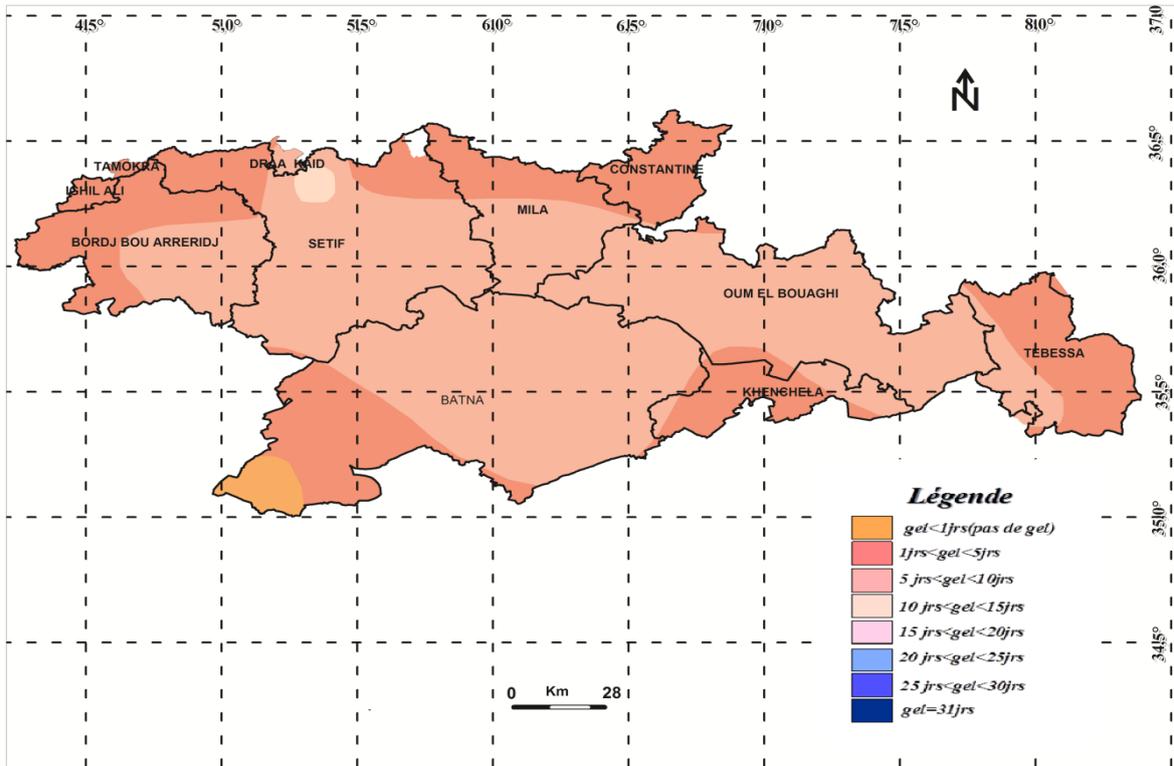


Figure 55. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois de mars

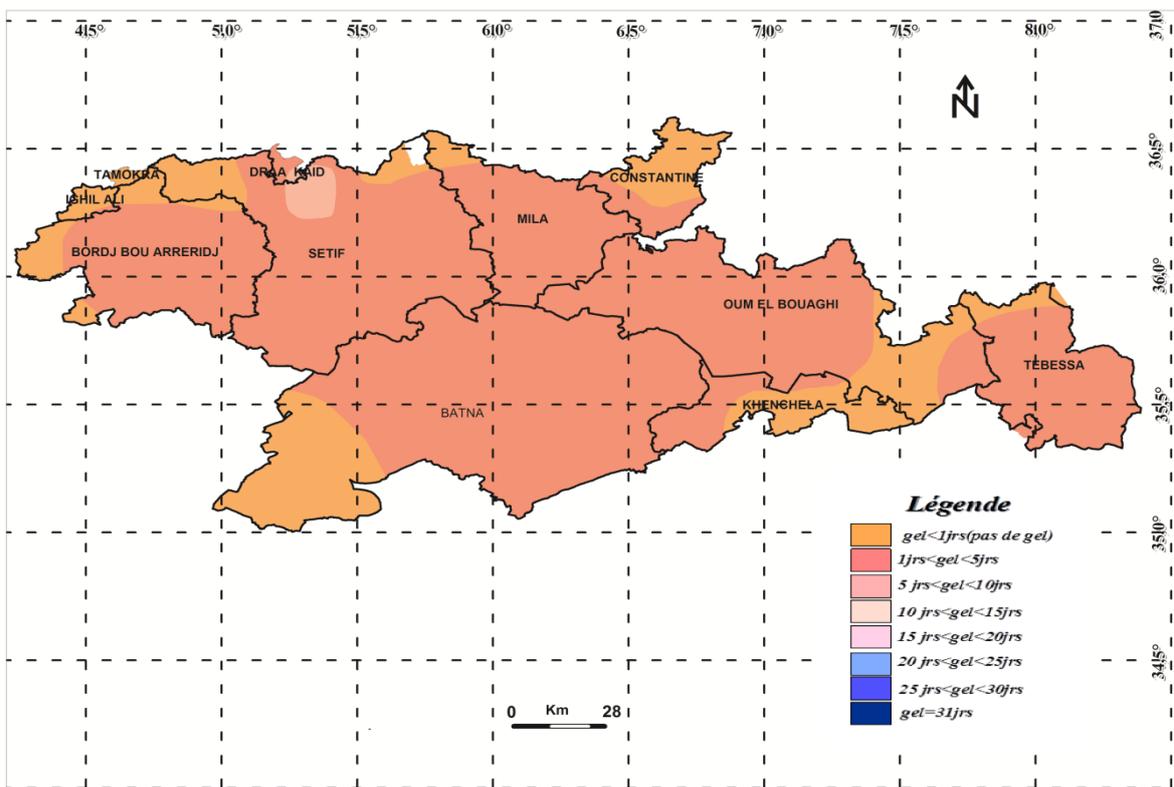


Figure 56. Répartition spatio-temporelle des gelées moyennes pour le mois d'avril

4.4. Cartographie de la zone apte à la céréaliculture

Tenant compte de la superposition des cartes thématiques des précipitations annuelles, de la carte de répartitions spatio-temporelles des gelées moyennes annuelles, de la nature des sols existant dans la région d'étude (Durand, 1974), de la couverture végétale de la région ainsi que de la carte du bâti et infrastructures. Nous avons réalisé une carte présentant les plages aptes à la mise en place de la céréaliculture. 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 suscitée. La carte finale donne un aperçu des aires qui regroupent les meilleures conditions d'environnement pour une production des céréales pluviales. La figure 57 montre la que répartition de la zone apte à la céréaliculture représentant environ le tiers de la région d'étude, avec une superficie totale égale à 10710 km². Cette zone est couverte en majorité par une plage de précipitation annuelle moyenne supérieure à 300 mm/an et par des gelées ne dépassant pas les 60 j/an.

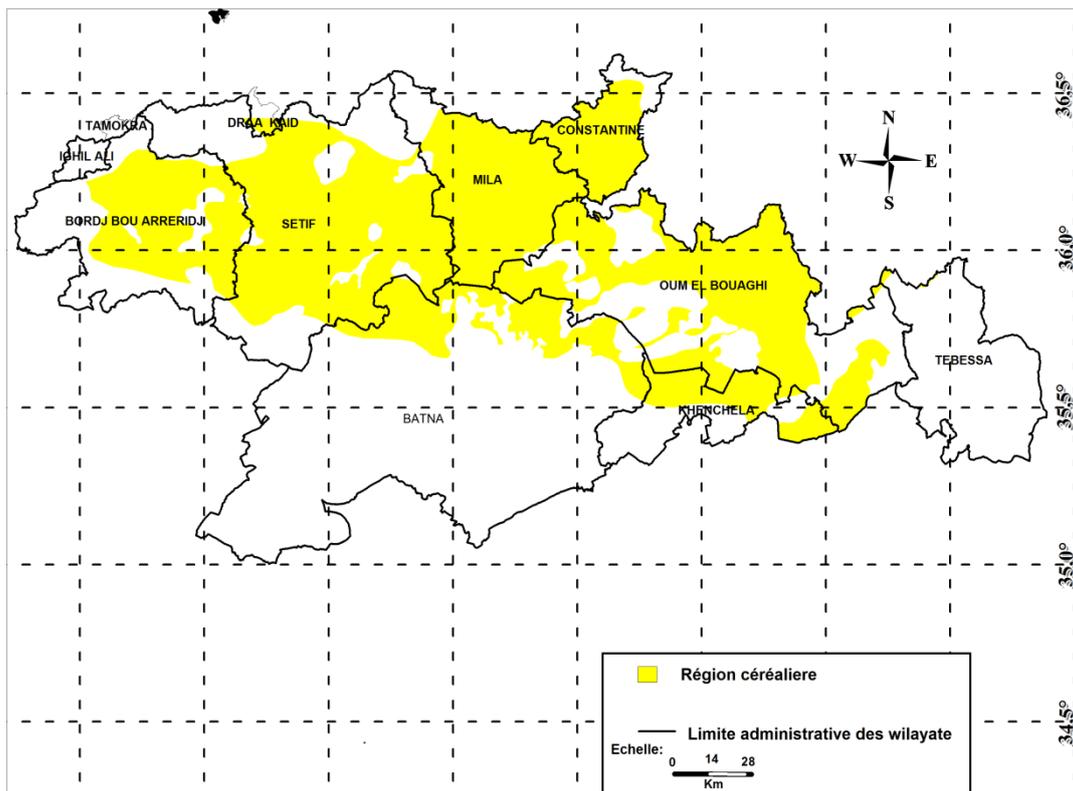


Figure 57. Répartition de zone apte à la céréaliculture dans la région d'étude

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les résultats de cette étude montrent l'importance de considérer les paramètres climatiques et physiques dans la délimitation des zones aptes à la céréaliculture pluviale. Cette étude s'est basée essentiellement sur le potentiel de précipitation de la région des Hauts Plateaux orientaux de l'Algérie et sur la répartition spatio-temporelle des gelées. Les données de précipitations fournies par les stations de mesures de la pluie sont souvent insuffisantes pour définir et délimiter les zones vulnérables, et la cartographie traditionnelle est peu utile lorsque l'incertitude est associée aux valeurs estimées aux emplacements non échantillonnés est nécessaire pour appuyer la prise de décision. La grande étendue de la zone prospectée et son importance économique soulignent l'importance de renforcer et d'élargir le réseau climatique actuel. La complexité de l'estimation des précipitations dans la région suggère de prendre en compte d'autres variables, telles que la température, le mouvement des masses d'air et la couverture végétale, pour mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur les précipitations. Dans cette étude, la RLM associée aux méthodes géostatistiques fournit un outil utile pour générer des cartes des précipitations avec une incertitude très réduite.

L'analyse géostatistique indique l'existence d'une dérive appuyant les résultats obtenus par la RLM concernant l'existence d'un fort gradient de précipitations Nord-Sud dans la zone d'étude par rapport aux précipitations annuelles. Aussi les différentes cartes de répartition spatiotemporelles des gelées ont montré que les céréales peuvent résister à ces aléas climatiques de par leurs stades de développement avancés. Par conséquent, la répartition de la zone apte à la céréaliculture représente environ le tiers de la région d'étude avec une superficie totale égale à 10710 km². Par ailleurs, l'application de cette méthode permet non seulement une meilleure estimation des paramètres climatiques, mais pourrait être utilisée efficacement pour la surveillance et le développement de ces zones qui sont particulièrement destinées aux activités agricoles, potentiellement préconisées pour la production des blés d'hiver et des orges. Les parties prenantes pourraient bénéficier de ces résultats afin d'optimiser les rendements des cultures. Enfin, l'approche proposée fournit un outil utile qui pourrait être facilement appliqué à d'autres régions ayant un réseau climatique peu dense, et elle pourrait également être utilisée pour d'autres paramètres climatiques nécessaires à l'étude climatologique et aux études environnementales et agronomiques.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- Abderrahmani B., Haouari M., Dobbi A., Hadjel M. & Hassini N.** (2009) Analyse et modélisation des extrêmes de température au niveau de quelques stations types du Nord-Ouest Algérien. *Geographia Technica, Special issue*. PP 5-10.
- Abeledo L-G, Savin R, Gustavo A et Slafer G-A.** (2008) Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European journal of Agronomy*. 28 (4): pp.541-550.
- Ahrens B** (2006) - Distance in spatial interpolation of daily rain gauge data. *Hydrol Earth Syst Sci*. 10: 197–208.
- Allard D, Monestiez P, Voltz M, Courault D, Lagacherie P.** (2002) - Spatialisation de données environnementales. *Ed. INRA, France*. pp. 3-10.
- Annicchiarico P, Abdellaoui Z, Kelkouli M, Zerargui H.** (2005) - Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi-dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *J Agri Scie*. 143, pp 57–64.
- Anctil 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.
- Ashiq M-W, Zhao C, Ni J, Akhtar M.** (2010) GIS-based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain–plain areas of upper Pakistan for regional climate change impact studies. *Theor Appl Climatol* 99:239-253.
- Bachir H, Semar A, Mazari A.** (2016) Statistical and Geostatistical analysis related to geographical parameters for spatial and temporal representation of rainfall in semi-arid environments the Case of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 9 (7), pp 486-498.
- 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 assimilés 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.
- 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.
- Baldy C, Elamami S.** (1965) Bioclimatologie de la Tunisie centrale, 3 tomes, 1 atlas. *FAO Ed., Tunisie*, 200p.
- Baldy C, Stigter C-J.** (1993) Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes. *Ed INRA*. 246p.
- Banta, R.M.** (1990) The role of mountain flows in making clouds, Atmospheric Processes over complex terrain, *Meteor.Monogr., No 45, Amer, Meteor. Soc.* p.173-228.

- 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.*
- Bargaoui Z-K, Chebbi A.** (2009) Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. *J Hydrol 365:56–73.*
- Barros, A.P & Lettenmaier D.P.** (1993) Dynamic on modelling of the spatial distribution of precipitation in remote mountainous areas, *Mon. Wea. Rev., 121, pp.1195-1214.*
- Beguïn M et Pumain D.** (2003) La représentation des données géographiques : statistique et cartographie. *Ed.Armand Colin- France, 192p.*
- Benabdesselam T et Amarchi H.** (2013) Regional approach for the estimation of extreme daily precipitation on north-east area of Algeria. *Int J Water Ress Environ Eng 5(10):573–583.*
- Bertrand-Krajewski J-L, Laplace D, Joannis C.** (2000) Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. *Paris (France). Tec et Doc, 808 p.*
- Bostana P-A, Heuvelink G-B-M, Akyurekc S-Z.** (2012) Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. *Int J Appl Earth Obser Geoinfo 19:115-126.*
- Boubelli S.** (2009) Identification et mise en évidence des formations hydrogéologiques de la wilaya de Khenchela (Nord-Est algérien). Analyse et synthèse de données. *Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 103 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.*
- Boyer J-S.** (1985) Water transport. *Ann. Plant physiology, n°36, pp 473-516*
- Branlard G., Pujos E., Nadaud I., Bancel E., Piquet A.** (2012) Nouveaux outils pour une analyse fine de la composition des grains. *Innovations Agronomiques, 19 : 37-49.*
- Brown, D-M. et Blackburn W-l.** (1987) Impacts of freezing temperatures on crop production in Canada. *Cano 1 Plant Sci., 67:1167-1180.*
- Brunsdon C., McClatchey J., Unwin D-J.** (2001) Spatial variations in the average rainfall–altitude relationship in Great Britain: an approach using geographically weighted regression. *Int J Climatol. 21: pp455–466.*
- Bulmer M-G.** (1979) Principles of statistics. Dover 108–123.
- Castany G.** (1963) Traité pratique des eaux souterraines : élément d'hydrologie de surface. *Ed. DUNOD Paris, pp. 3-106.*
- Chenafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A., Saci A.** (2006) Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian Journal Plant Sci, 5, pp.854-860.*
- Chilès J-P.** (1995) Quelques méthodes de simulation de fonctions aléatoire intrinseques. *Cahier de géostatistique, (5), pp 97-112.*
- 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.*
- CIC.** (2010) Rapport annuel du marché mondial des céréales. Conseil International des céréales.
- CIC.** (2013) Rapport annuel du Marché Mondial des céréales. Conseil International des Céréales www.igc.int/.
- Cook R-D.** (1977) Detection of influential observations in linear regression. *Technometrics* 19:15–18
- Cook E-R., Briffa K-R., Jones P-D.** (1994) Spatial regression methods in dendroclimatology- a review and comparison of 2 techniques. *Int J Climatol.* 14. Pp 379-402.
- Cook J., Johnson V-A., Allan R-E.** (1991) Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne. Organisation de coopération et de développement économiques, Belgique. Le blé. *In.Greef.M.W. (Eds).* pp 27-38.
- Cosma S, Richard E., Miniscloux F.** (2002) The role of small scale orographic features in the spatial distribution of precipitation. *Q.J.R.M.S.,* 128 (579) p.75-92.
- Courault D et Ruget F.** (2001) Impact of local climate variability on crop model estimates in the South-East of France. *Ed. Climate Research, 18, pp195-204.*
- Dagnelie P.** (1973) Théorie et méthode statistique applications agronomiques. *Ed. Presses de Gembloux, Belgique, Vol. 2, 458p.*
- Dagnelie P.** (2011) Statistique théorique et appliquée - Inférence statistique à une et à deux dimensions. *Tome 2. Ed. De Boeck Services. 736 p.*
- De Blomac F., Gal R., Hubert M., Richard D., et Tournet C.** (1994) Conception et application en géomatique. *Ed. Hermes. 248p.*
- Dekhil S.** (1991) L'eau et le développement de l'irrigation en Algérie. *Medit* 1 (2). 34-38
- 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.*
- Denegre J., et Salge F.** (2004) Les systèmes d'information géographique. *Ed. PUF- Paris. 128 pages.*
- Dibike Y-B and Coulibaly P.** (2006) Temporal Neural Networks for Downscaling Climate variability and Extremes, Neural Networks. *Earth Sciences and Environmental Applications of Computational Intelligence), Vol. 19, No. 2, pp. 135-144.*
- Didier M.** (1992) Utilité et valeur de l'information géographique. *Ed. Econo- Paris. 255p.*
- Dingman S., Seely D., Reynolds R.** (1988) Application of kriging to estimate mean annual rainfall in a region of orographic influence. *Water Res. Bull.* 24:329–339.
- Djermoun A.** (2009) La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Nature et Technologie. 01. pp45-53.*
- 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.*
- Dubé P-A.** (2005) Evaluation du Zonage Agroclimatique Québécois au cours du prochain siècle. Travaux de Recherche 1972-1986, 65^{ème} Congrès des Agronomes Québécois. pp 1-8, 143 p.
- Durant J-H.** (1954) Les sols d'Algérie, *Service des Études scientifiques, Pédologie, 2 :01. 244 p*
- 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.*
- Escourrou G.** (1978) Climatologie pratique, *Ed. Masson, 194p.*
- Estienne P et Godard A.** (1970) Climatologie. Ed. Colin Armand, *Coll. Librairie Armand COLIN, Paris, 366 p, pp 67-69.*
- FAO.** (2014) Blé : Classement Mondial des Pays producteurs et prévisions à la fin 2014
- FAO.** (2015) 2015/2030 Perspectives par grand secteur. Agriculture mondiale: horizon 2015/2030. Rapport abrégé
- FAO.** (2016) Situation alimentaire mondiale. Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/>
- Feillet P.** (2000) Le grain de blé composition et utilisation. 1^{ère} édition. *INRA. Paris, 303p.*
- Feliachi K.** (2000). Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. *Acte du 1^{er} symp. Inter. Filiale blé. OAIC. Pp. 21-28.*
- Ferreira M-S-L.** (2011) Dynamique d'assemblage des protéines de réserve et du remplissage du grain de blé dur. *Thèse. Doct. CIHEAM, 261p.*
- Fowler D-B., Limin A-E.** (1997). Breeding for winter hardiness in cereals. *Acta agronomica Hungarica, 45 (3): 301-309.*
- Gachon P., et Dibike Y- B.** (2007). Temperature change signals in northern Canada: convergence of statistical downscaling results using two driving GCMs, *Inte J Climatology, 27(12): pp. 1623-1641.*
- Gilliot J-M.** (2000) Introduction aux systèmes d'information géographique. *Paris, p 110.*
- Goodale C-L., Aber J-D., Ollinger S-V.** (1998) Mapping monthly precipitation, temperature, and solar radiation for Ireland with polynomial regression and a digital elevation model. *Clim Res. 10, pp35-49.*
- Goovaerts P.** (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J Hydrol 228: pp11-129.*
- Harris H-C., Cooper P-J-M., et Pala M.** (1991) Soil and crop management for improved water use efficiency in rainfed areas, ICARDA. Aleppo, pp 106-118.
- Hay L., Viger R., McCabe G.** (1998) Precipitation interpolation in mountainous regions using multiple linear regressions. *Hydrol Water Resour Ecol Headwaters. 248, pp 33-38.*

- Heusch B.** (1970) Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-rif occidental. *SRFR, Maroc. Tome 12. 176p.*
- Hevesi J., Flint A., Istok J.** (1992) Rainfall estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics; part 1 and 2. *J Appl Meteo 31: pp66–688.*
- Houha B.** (2007) Etude du fonctionnement hydrogéologique et salin d'un bassin semi-aride. Rémila – Khenchela. *Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.*
- Johnson G-L., Hanson C-L.** (1995) Topographic and atmospheric influences on rainfall variability over a mountainous watershed. *J Appl Meteo 34: pp 68–74.*
- Kawamura A., Jinno K., Berndtsson R., Furukawa T.** (1997) Real-time tracking of convective rainfall properties using a two-dimensional advection-diffusion model. *J. Hydrol. 203, pp 109-118.*
- Kellou R.** (2010) Les exportateurs céréaliers français sur le marché algérien du blé : opportunités et contraintes. *Les Cahiers du CREAD, 94, pp 77-104.*
- Kious L., Bachir H., Amroun R., et Deraoui M.** (2010) Evaluation du programme national pour le développement de la céréaliculture par l'irrigation. *Céréaliculture. 02 (55), pp 42-60.*
- Körner C.** (1999) Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems. *Springer, Berlin. 339 pages.*
- Koteswaram P.** (1974) Climat et météorologie. *Edit. ISBN. U.N/E/S.C.O. Paris, pp. 29-52.*
- Kramer K., Leinonen I., Loustau D.** (2000) The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems : An overview. *Int J. Biometeo 44 (2), pp 67-75.*
- Kyriakidis P-C., et Journel, A-G** (1999) Geostatistical space-time models: a review. *Mathematical Geology, Vol. 31 (6), pp 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.*
- Laffitte R.** (1939) Etude géologique de l'Aurès. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, Alger, 2ème sér. Bull. n° 15.*
- Lam N.** (1983) Spatial interpolation methods. *American Cartographer 10 (2):129–149.*
- Lazar Ph, Schawartz D.** (1997) Eléments de probabilités et statistiques. *Ed. Flammarion Médecin, Paris 1997. 163 p.*
- Lloyd C-D.** (2005) Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *J Hydrol. 308: pp128–150.*
- Lloyd C-D.** (2010) Nonstationary models for exploring and mapping monthly precipitation in the United Kingdom. *Inter J Clim, 30 (3), 390–405.*
- López-Bellido L., López-Bellido R-J., Castillo J-E., López-Bellido F-J.** (2000) Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J. (92): 1054-1063.*

- Madani D.** (2008) Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone à déficit hydrique. *Thèse mag. Université de Batna, 116p.*
- Marks D., Winstral A., Reba M., Pomeroy J., Kumar M.** (2013) An evaluation of methods for determining during-storm precipitation phase and the rain/snow transition elevation at the surface in a mountain basin. *AdvWater Resour 55:98–110.*
- Matheron G.** (1965) Les variables régionalisées et leur estimation. *Ed Masson & Cie, Paris 306p.*
- Meddi M., Toumi S.** (2015) Spatial variability and cartography of maximum annual daily rainfall under different return period in the north of Algeria. *J. Mt. Sci. 12 (6):1403–1421.*
- Meehl G-A., Zwiers F., Evans I., Knutson T, Mearns L., et Whetton P.** (2000) Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change». *Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 81, p. 427-436.*
- Mekhlouf A., Dehbi F., Hannachi A., Harbi M.** (2012) Réponses du blé dur (*Triticum durum*, Desf.) aux basses températures en relations avec la capacité de production. *03, pp 13-23*
- Miniscloux F.** (2001) Précipitations orographiques et convectives en région Cévennes-Vivarais : validation de simulations numériques par des données pluviométriques et radar. *Thèse de l'INPG, 193p.*
- Miniscloux F., Anquetin S, Creutin, J-D.** (2001) Geostatistical analysis of orographic rainbands. *Journal of Applied Meteorology, Vol 40., No 11, p.1835-1854.*
- Monneveux P. et Belhassen E.** (1996) The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant growth regulation, n°20, pp 85-92.*
- Moron V.** (1996) Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992). *Cah, sech. Vol 7n° 01, pp25-32.*
- Mouchiroud D.** (2002) Mathématiques : Outils pour la Biologie, *Deug SVI – UCBL, pp 13-19.*
- Moule C.** (1980) Céréales techniques d'avenir, phytotechnie spéciale. *Ed. la maison rustique, paris, 318 p.*
- Myoung-Jin U-M., Hyeseon Y., Chang-Sam J., Jun-Haeng H.** (2012) Factor analysis and multiple regression between topography and precipitation on Jeju Island, Korea. *J Hydrol 410:189–203.*
- Nachit MM., Picard E., Monneveux P., Labhilili M., Baum M., Rivoal R.** (1998) Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. *Cahiers Agric. 7: 510-515.*
- Naoum S., Tsanis I-K** (2004) A multiple linear regression GIS module using spatial variables to model orographic rainfall. *J Hydroinf. 06(1): pp 39–56.*
- Oki, T., & K. Musiaka** (1991). Spatial rainfall distribution at a storm event in mountainous regions, estimated by orography and wind direction. *Water Resources Research 27 : 359–369.*
- Orlanski I.** (1975). A rational subdivision of scale for atmospheric processes. *Bulletin American Meteorological Society 56 : 527–530.*

- Osborn T-J., et Hulme M.** (1997) Development of a relationship between station and grid-box rainfall frequencies for climate model evaluation». *Journal of Climate*, vol. 10, p. 1885-1908.
- Ouallouche F., Ameur S.** (2014) Rainfall detection over northern Algeria by combining MSG and TRMM data. *Appl Water Sci* 6:1–10.
- Pannatier Y.** (1996) Variowin software for spatial data analysis in 2D. *Springer Verlag, notice 91p.*
- Pèguy J-P.** (1970) *Précis de climatologie*. Ed. Masson et C^{ie}, Paris, 468p.
- Piccini C., Marchetti A., Farina R., Francaviglia R.** (2012) Application of indicator kriging to evaluate the probability of exceeding nitrate contamination thresholds. *Int J Environ Res* 6 (4): 853-862.
- Pictav S-J.** (1856) Bulletin de l'Algérie. 1ère édition. Just Rouvier, libraire éditeur, Paris, 405p.
- Pornon H.** (1992) Les SIG: Mise En Oeuvre Et Applications, *Ed. Hermes. 158p.*
- Prise D-T., McKenney D-W., Nalder I-A., Hutchinson M-F., Kesteven J-L.** (2000) A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agri Forest Meteo* 101:81–94.
- Rastoin J-L., et Benabderrazik E-H.** (2014) Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb Pour un co-développement de filières territorialisées- *Construire la méditerranée. IPEMED. Pp 1-30.*
- RGA.** (2003) Rapport général des résultats définitifs du recensement général de l'agriculture. *MADRP, 125 p.*
- Reinheimer J-L., Barr A-R., Eglinton J-K.** (2004) QTL mapping of chromosomal regions conferring reproductive frost tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 109 (6): 1267–1274.
- 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.*
- Roy P.** (2009) Analyse et validation des extrêmes et de la variabilité des températures et de la précipitation du modèle régional canadien du climat. *These doct. 124p.*
- Saeedipour S., Moradi F.** (2011) Effect of Drought at the Post-anthesis Stage on Remobilization of Carbon Reserves and Some Physiological Changes in the Flag Leaf of Two Wheat Cultivars Differing in Drought Resistance. *Journal of Agricultural Science*. 3 (3): 81-92.
- Sangati M., and Borga, M.** (2009). Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, (2): 575-574.

- Seguin B.** (1986) Inventaire des données climatiques. Séminaire : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne - Toulouse 16-17 Avril 1986. *Coll. INRA N°39, Paris, Ed. INRA Paris, pp. 35-36.*
- Seltzer P.** (1949) *Le climat de l'Algérie. Alger. 219p.*
- Semcheddine N., Hafsi M.** (2014) Effect of Supplementary Irrigation on Agronomical and Physiological Traits in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes. *Journal of Agricultural science. 6(9). pp 184-197.*
- Sheather S-J.** (2009) A modern approach to regression with R, chapter 5: multiple linear regression. *Springer Science. Business Media. pp125–149.*
- Skirvin S-M., Marsh S-E., McClaran M-P., Meko D-M.** (2003) Climate spatial variability and data resolution in a semi-arid watershed, southeastern Arizona. *J Arid Environ 54:667–686.*
- Slafer G-A., Rawson R-M.** (1994) Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Australian journal of Plant physiology. 21(4), pp 393-426.*
- Slimani M., Cudennec C., Feki H.** (2007) Structure of the rainfall gradient in the Sahara transition in Tunisia: geographical determinants and seasonality. *Hydrol Sci J. 52 (6):1088-1102.*
- Smadhi D., Zella L.** (2012) The pluviometrical deficiencies in the pluvial cereal regions in Algeria. *Afric Jour of Agric Resea 7(48):6413–6420.*
- Smadhi D.** (2010) Régionalisation et modélisation agroclimatique en agriculture pluviale. Cas du Nord de l'Algérie. *Thèse Doctorat. ENSA.155p.*
- Snee R-D.** (1986) An alternative approach to fitting models when reexpression of the response is useful. *J Quality Techno 18:211–225.*
- Srivastava J-P.** (1984) Durum wheat: its world status and potential in the Middle East and North Africa. *Rachis, 3(1): 1-9.*
- Subyani A-M.** (2004) Geostatistical study of annual and seasonal mean rainfall patterns in southwest Saudi Arabia. *Hydrol Sci J 49(5):803–817.*
- Subyani A-M., Al-Dakheel A-M.** (2009) Multivariate geostatistical methods of mean annual and seasonal rainfall in southwest Saudi Arabia. *Arab J Geosci 2:19–27.*
- 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.*
- Valipour M.** (2016) Optimization of neural networks for precipitation analysis in a humid region to detect drought and wet year alarms. *Meteorol Appl 23(1):91–100.*
- 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.*
- Vavrus S., Walsh I-E., Chapman W-L., et Partis D.** (2006) The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *International Journal of Climatology, vol. 26, p. 1133-1147.*

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.*

Viers G., et Vigneau J-P. (1990) *Eléments de climatologie. Ed : Nathan. 224 p.*

Villa J-M. (1980) La chaîne alpine d'Algérie Orientale et des confins Algéro-Tunisiens. *Thèse Sciences, Pierre et Marie Curie, Paris VI, 450 p.*

Walpole R-E., Myers R-H., Myers S-L. and Ye K. (2007) *Probability and statistics for engineers and scientists. , 8th ed., Pearson Prentice Hall, Pearson Prentice Hall 791p.*

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*

Zouaoui A., et Bensaid R. (2007) Détermination des exigences climatiques du blé dur (*Triticum Durum* Desf. var. Mohamed Ben Bachir) en zone semi-aride. *Cahiers Agricultures. 16 (06), pp 469-476*