



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université des frères Mentouri Constantine1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Ecologie Végétale

N° d'ordre : 24/DS/2021
N° de série : 02/ECO/2021

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention de diplôme de doctorat en Sciences

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Ecologie végétale

Thème

Etude de la variation spatiotemporelle des précipitations dans le Nord-Est algérien

Présentée par :

MERNIZ Noureddine

Soutenue le : 02/03/2021

Devant le jury :

Président : **HAMIDECHI M. Abdelhafid**

Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1

Directeur de thèse : **TAHAR Ali**

Pr. Université Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs : **HOUHAMDI Moussa**

Pr. Université 8 mai 1945-Guelma

SAHLI Leila

Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1

BAZRI Kamel Eddine

M.C.A. Université Frères Mentouri-Constantine1

MOSTEPHAOUI Tewfik

M.C.A. C.R.S.T.R.A. Biskra

Année universitaire : **2020/2021**



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université des frères Mentouri Constantine1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Ecologie Végétale

N° d'ordre : 24/DS/2021
N° de série : 02/ECO/2021

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention de diplôme de doctorat en Sciences

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Ecologie végétale

Thème

Etude de la variation spatiotemporelle des précipitations dans le Nord-Est algérien

Présentée par :

MERNIZ Noureddine

Soutenu le : 02/03/2021

Devant le jury:

Président : **HAMIDECHI M. Abdelhafid**

Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1

Directeur de thèse : **TAHAR Ali**

Pr. Université Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs : **HOUHAMDI Moussa**

Pr. Université 8 mai 1945-Guelma

SAHLI Leila

Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1

BAZRI Kamel Eddine

M.C.A. Université Frères Mentouri-Constantine1

MOSTEPHAOUI Tewfik

M.C.A. C.R.S.T.R.A. Biskra

Année universitaire : **2020/2021**

Remerciement

Qu'il me soit permis de remercier en premier lieu Dieu pour sa clémence et sa miséricorde.

Cette thèse de doctorat est le fruit de douze années de recherches alternées avec mes activités d'enseignement à l'université de M'sila. Elle résulte de l'acquisition, l'exploitation et de la valorisation des données pluviométriques portants sur une région d'étude vaste, qui est le Nord-est algérien. Ce fut une période enrichissante pour moi, tant aux niveaux scientifique, personnel que professionnel.

Au terme de cette étude, il m'est très agréable d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Je tiens dans un premier temps à remercier Mr **TAHAR Ali**, professeur au département de Biologie de l'université d'Annaba, qui a accepté de diriger ce travail et a veillé au bon déroulement de ces années, en m'apportant des critiques constructives et des conseils pertinents, et ce suite à l'intérêt qu'il a accordé à mes travaux de recherches.

J'exprime également ma sincère reconnaissance aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail :

Mr **Mohamed Abdelhafid Hamidechi**, Professeur à l'Université des Frères Mentouri. Constantine 1, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce travail.

Mr **Houhamdi Moussa**, Professeur à l'Université 8 Mai de Guelma, qui a accepté d'examiner ce travail.

Mr **Tewfik Mostephaoui**, Maître de conférences « A », à CRSTRA. Biskra, pour avoir accepté de faire partie du jury.

M^{elle} **Leila SAHLI**, Maître de conférences « A » à l'Université des Frères Mentouri. Constantine 1, qui a bien voulu juger ce travail.

Mr **Kamel Eddine BAZRI**, Maître de conférences « A » à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier le personnel de l'**O.N.M** de Constantine et ceux du **C.N.C** d'Alger pour avoir permis l'acquisition des données que nous avons traitées et en particulier les techniciens ou assistants ingénieurs qui permettent cette acquisition des données dans de bonnes conditions. Nous remercions notamment Mr **Bekhouche** et Mr **Khouthir**.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à l'ensemble du corps enseignant de la faculté des Sciences et en particulier le département de Biologie et Ecologie végétale pour le dévouement et l'esprit d'abnégation qui ont toujours sous-tendu leur travail pour nous inculquer la rigueur scientifique et l'esprit naturaliste de cette discipline.

Je ne saurais terminer sans manifester ma reconnaissance à l'endroit de tous mes amis et mes collègues qui ont partagé avec moi des moments de peine et de joie. Ce travail est le vôtre, car c'est grâce à votre soutien moral qu'il a pu être ainsi.

Je remercie tous ceux dont le nom n'apparaît pas dans ces pages ; ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ces travaux de thèse.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à mes parents, ma femme, mes enfants, mes frères et sœurs, à qui j'étais depuis longtemps, subtilisé par les charges de cette thèse.

Liste des abréviations

A.N.R.H	Agence Nationale des Ressources Hydriques
O.N.M.	Office National de Météorologie
ACP	Analyse en Composantes Principales
ACPR	Analyse en Composantes Principales avec rotation
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
O.M.M	Organisation Météorologique Mondiale
GES	Gaz à Effet de Serre
MK	Mann-Kendall
GIEC	Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Chang

Liste des tableaux

Tableau 1: Coordonnées géographiques des 22 stations météorologiques dans le Nord-Est de l'Algérie (1978 - 2010).....	30
Tableau 2: Résultats du test de Pettitt et de Von Neumann.....	37
Tableau 3: Caractéristiques descriptives des séries d'observations à l'échelle annuelle.	41
Tableau 4: Variabilité des précipitations annuelles dans les stations étudiées (1978-2010).....	42
Tableau 5: Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement pour les stations étudiées.....	46
Tableau 6: Résultats du test de corrélation sur le rang appliqué aux séries pluviométriques annuelles à un seuil de 95%.	50
Tableau 7: Evolution générale des pluies annuelles exprimée par la valeur de a	56
Tableau 8: Tendances des précipitations annuelles dans les différentes stations au seuil de 95%. .	59
Tableau 9: Résultats des tests de corrélation du rang de Spearman pour les précipitations annuelles sur la période de 1978 à 2010.....	61
Tableau 10: Dates de rupture dans les séries pluviométriques de la période 1978-2010	67
Tableau 11: Caractéristiques des changements détectés pour les stations ayant une rupture probable.....	68
Tableau 12: Moyenne du nombre de jours de pluie par an et relation avec les pluies annuelles.....	71
Tableau 13: Evolution générale du nombre de jours de pluie par an exprimée par la valeur de a ...	74
Tableau 14: Tendances spatiales du nombre de jours de pluie dans les stations étudiées.	75
Tableau 15: Résultats des tests de corrélation du rang de Spearman pour le nombre de jours de pluie par an sur la période de 1978 à 2010.....	78
Tableau 16: Variations expliquées pour cinq premières composantes principales.....	104
Tableau 17: Pourcentage de la variance expliquée après rotation Varimax.....	108

Liste des figures

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.	17
Figure 2: Carte altimétrique de l'Algérie orientale ; source : propre élaboration	18
Figure 3: Couverture végétale de l'Est algérien (d'après la carte internationale du tapis végétal au 1/1000 000 feuilles Tunis-Sfax et Alger) ; in : Mebarki, 2005.....	20
Figure 4: Réseau hydrographique de l'Algérie orientale ; source : propre élaboration	24
Figure 5: Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien. (Établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989) ; in Mebarki, 2005.....	26
Figure 6: Répartition spatiale des stations météorologiques sélectionnées dans le Nord-Est de l'Algérie.	30
Figure 7: Pourcentage des données manquantes des précipitations annuelles (1978-2010).	31
Figure 8: Pourcentage des données manquantes des précipitations mensuelles (1978-2010).....	31
Figure 9: Contrôles des totaux annuels des précipitations par la méthode des doubles cumuls.	35
Figure 10 : Distribution spatiale du coefficient de variation des pluies annuelles	43
Figure 11: Relation entre la latitude et le coefficient de variation (Cv).....	45
Figure 12: Autocorrélogrammes annuels des stations de la région d'étude pour la période 1978-2010.	54
Figure 13: Tendence linéaire des pluies annuelles et moyenne mobile sur 7 ans à la station de Jijel.	62
Figure 14: Fonction d'autocorrélation du nombre de jours de pluie pour les stations de Guelma et Biskra (période 1978-2010).	73
Figure 15: Distribution spatiale des tendances du nombre de jours de pluies au Nord-Est algérien(1978-2010).....	77
Figure 16: Évolution annuelle du nombre de jours de pluie pour les stations présentant des tendances significatives.	77
Figure 17: Tendence linéaire du nombre de jours de pluie et moyenne mobile sur 7 ans pour les stations étudiées (1978-2010).	83
Figure 18: Variabilité mensuelle en janvier (1978-2010)	86
Figure 19: Variabilité mensuelle en février (1978-2010).....	87
Figure 20: Variabilité mensuelle en mars (1978-2010).....	87
Figure 21: Variabilité mensuelle en avril (1978-2010).....	88
Figure 22: Variabilité mensuelle en mai (1978-2010)	89
Figure 23: Variabilité mensuelle en juin (1978-2010).....	90
Figure 24: Variabilité mensuelle en juillet (1978-2010)	91
Figure 25: Variabilité mensuelle en août (1978-2010)	92
Figure 26: Variabilité mensuelle en septembre (1978-2010).....	93
Figure 27: Variabilité mensuelle en octobre (1978-2010)	94
Figure 28: Variabilité mensuelle en novembre (1978-2010)	95
Figure 29: Variabilité mensuelle en décembre (1978-2010).....	96
Figure 30: Les pourcentages des significations et les directions des tendances dans les différents mois pour les précipitations moyennes mensuelles.	98
Figure 31: Distribution spatiale tendancielle des précipitations mensuelles ; source : propre élaboration	100

Figure 32: Représentation de la variance expliquée et cumulée des résultats de l'ACP sur la région d'étude.	104
Figure 33: Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F2.....	105
Figure 34: La chronique temporelle associée à la première composante principale.....	105
Figure 35: La chronique temporelle associée à la deuxième composante principale.....	106
Figure 36: Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F3.....	107
Figure 37: La chronique temporelle associée à la troisième composante principale.	107
Figure 38: Plan principal des variables de l'ACPR (axes 1 et 2).	109
Figure 39: La chronique temporelle associée à la première composante principale.....	109
Figure 40: La chronique temporelle associée à la deuxième composante principale.....	110
Figure 41: Représentation des variables de l'ACPR (axes 1 et 3).	110
Figure 42: La chronique temporelle associée à la troisième composante principale.	111
Figure 43: Représentation des variables de l'ACPR (axes 4 et 5).....	112
Figure 44: La chronique temporelle associée à la quatrième composante principale	112
Figure 45: La chronique temporelle associée à la cinquième composante principale.....	113
Figure 46: Classification hiérarchique ascendante (CHA) des stations pluviométriques du Nord-Est algérien (1978-2010).....	116
Figure 47: Profil des classes résultant de l'CHA en fonction des précipitations annuelles du Nord-Est algérien (1978-2010).	117

Table des matières

Liste des abréviations	i
Liste des tableaux	ii
Liste des figures.....	iii
Introduction	1
Chapitre I : Changement climatique et évolution des régimes pluviométriques.....	5
I.1. Variabilité du climat et changement climatique	5
I.2. Évolution des régimes pluviométriques.....	7
Chapitre II : Situation géographique, Reliefs, végétation naturelle, et réseau hydrographique au Nord.....	14
II.1. Localisation géographique	14
II.2. Reliefs	14
II.2.1. Les plaines littorales	14
II.2.2. L'Atlas tellien et les bassins intérieurs.....	15
II.2.3. Les hautes plaines	16
II.2.4. L'Atlas saharien	16
II.2.5. Le piedmont sud de l'Atlas saharien	17
II.3. Contexte orographique	18
II.4. Géologie	19
II.5. Végétation	20
II.5.1. Végétation forestière.....	21
II.5.2. Végétation steppique	21
II.5.3. Végétation des terres cultivées	22
II.5.4. Végétation des oasis sahariennes	22
II.5.5. Prairies naturelles.....	23
II.6. Réseau hydrographique	23
II.7. Régime des pluies au Nord-Est algérien	24
Chapitre III : Données pluviométriques: critiques et homogénéité.....	27
III.1. Choix des stations et critiques des données.....	27
III.1.1. Aperçu sur le réseau pluviométrique au Nord-Est algérien	27
III.1.2. Choix des stations pluviométriques et la période d'étude.....	28
III.2. Vérification et contrôle des données pluviométriques.....	31
III.2.1. Estimation des données manquantes.....	31
III.2.2. Examen de l'homogénéité des séries.....	33
Chapitre IV : Variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles au Nord-Est algérien.....	38
IV.1. La variabilité spatiale des pluies annuelles au Nord-Est algérien.....	38
IV.1.1. La variabilité absolue des pluies annuelles	41

IV.1.2. La variabilité relative des pluies annuelles	42
IV.1.3. Modèles spatiaux d'asymétrie et d'aplatissement.....	45
IV.2. Variabilité temporelle des pluies annuelles au Nord-Est algérien	47
IV.2.1. Analyse du caractère aléatoire des séries pluviométriques.....	48
IV.2.2. Méthodes de détection de tendances des précipitations annuelles au Nord-Est algérien	54
IV.2.3. Tests de détection de ruptures dans les séries des pluies annuelles.....	63
Chapitre V : Variabilité spatio-temporelle du nombre de jours de pluie par an au Nord-Est algérien	69
V.1. Variation spatiale du nombre de jours de pluie et relations avec les cumuls annuels	70
V.2. Variabilité temporelle du nombre de jours de pluie par an	71
V.2.1. Caractère aléatoire des séries d'observations (Application de l'autocorrélogramme).....	72
V.2.2. Tendances du nombre de jours de pluie par an.....	73
Chapitre VI : Variabilité spatio-temporelle des précipitations mensuelles dans le Nord-Est algérien	84
VI.1. Variabilité des précipitations mensuelles dans l'espace.....	84
VI.2. Variabilité temporelle des précipitations mensuelles au Nord-Est algérien	97
Chapitre VII : Structures de la variabilité des précipitations : Recherche d'une régionalisation	101
VII.1. Analyse en Composantes Principale (ACP)	101
VII.1.1. Théorie de l'ACP	102
VII.1.2. Résultats de l'ACP.....	103
VII.2. La classification ascendante hiérarchique (CAH).....	113
VII.2.1. Théorie de la CAH.....	113
VII.2.2. Arbre hiérarchique (Dendrogramme).....	114
Conclusion et perspectives	118
Références bibliographiques.....	123
Annexes	
Résumés	

Introduction

Au cours des dernières décennies, les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures. Le développement à l'échelle locale et régionale, voire même à l'échelle internationale, aux côtés du développement durable, la préservation et la protection des écosystèmes, peuvent être affectés par le changement et la variabilité climatiques et les interactions interspécifiques avec les ressources en eau. En effet, la dynamique du climat influence souvent les moyens de subsistance qui dépendent des ressources naturelles. La majorité des populations, en particulier celles du tiers monde, dépendent beaucoup des ressources naturelles au sein des écosystèmes, elles sont altérées par la dégradation des conditions environnementales et par des facteurs tels que le changement climatique, ce qui influence sur leur stabilité et sécurité alimentaire.

Pour cela, la communauté scientifique s'est beaucoup intéressée à l'étude de la variabilité climatique et au changement climatique durant ce siècle. De nombreux chercheurs ont essayé d'étudier, de diagnostiquer et de déterminer le système climatique et sa variabilité pour différentes régions.

La variabilité des précipitations est l'un des éléments les plus importants pour les études climatiques et hydrométéorologiques. Ainsi, les tendances spatiales et temporelles des précipitations sont importantes pour l'analyse du climat et les planificateurs des ressources en eau (Sayemuzzaman et Jha, 2014). Cependant, la pluviométrie est un élément climatique essentiel car, c'est le facteur le plus important dans la régionalisation des conditions climatiques et environnementales, et affecte les schémas temporels et spatiaux de la variabilité climatique (Javari, 2016).

Dans le contexte actuel du changement climatique, de nombreuses études ont montré que dans le bassin méditerranéen, les tendances de la variabilité des précipitations, à différentes échelles de temps, sont en diminution significative. (Piervitali *et al.*, 1997 ; IPCC., 2001 ; Türkeş *et al.*, 2008 ; Philandras *et al.*, 2011 ; Trambly *et al.*, 2013).

Les pays Nord africains, et spécifiquement l'Algérie présentent une sensibilité accrue à la variabilité climatique, et aux précipitations en particulier, en raison de leurs effets sur les structures économique, sociale et démographique. En effet, l'accroissement des phénomènes climatiques extrêmes (crues, inondations) dans plusieurs régions de l'Algérie et leur médiatisation ont contribué à tirer la sonnette d'alarme sur l'hypothèse que ceux-ci pouvaient être dus au réchauffement climatique.

En Algérie, l'étude de l'évolution spatiale, des tendances temporelles et de la régionalisation des précipitations ont été menées sur l'ensemble ou une partie du pays, comme celles par exemple de : Meddi et Meddi, 2007 ; Taibi *et al.*, 2015 ; Nouaceur et Murărescu, 2016; Bessaklia *et al.*, 2018 . Mais peu de recherches se sont penchées sur la variabilité et les tendances des précipitations dans l'Est algérien. Ces études s'intéressaient beaucoup plus aux bassins hydrographiques. De plus, elles ont été menées sur des données pluviométriques qui proviennent de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (A.N.R.H) qui utilisent des stations différentes de celles utilisées par l'Office National de Météorologie (O.N.M) (par exemple : Balah et Amarchi, 2016; Mred *et al.*, 2018).

Dans les études de détection des tendances des précipitations annuelles, mensuelles et le nombre de jours pluvieux par an, plusieurs méthodes statistiques ont été développées et utilisées au fil des ans (Modarres et Sarhadi, 2009 ; Nasri et Modarres, 2009 ; Nel, 2009 ; Lopez-Moreno *et al.*, 2010 ; Caloiero *et al.*, 2011 ; Duhan et Pandey, 2013). La méthode la plus couramment utilisée est le test statistique non paramétrique Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) pour quantifier l'importance des tendances dans les séries chronologiques des précipitations (Modarres et da Silva, 2007; Batisani et Yarnal, 2010 ; Tabari *et al.*, 2011 ; Zhao *et al.*, 2015). Ce test ne fournit pas l'ampleur de la tendance. Pour cela, une autre méthode appelée l'estimateur de la pente de Sen est très utilisée pour quantifier la pente de la tendance (Partal et Kahya, 2006 ; Tabari et Talae, 2011; Duhan et Pandey, 2013; Da Silva *et al.*, 2015). En Algérie, la régionalisation des précipitations a fait l'objet de diverses recherches, en utilisant diverses méthodes telles que l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) (Medjerab et Henia, 2005 ; Meddi *et al.*, 2013 ; Chibane *et al.*, 2015).

Il est ainsi apparu nécessaire d'apporter des éléments de réponse quant à la variabilité des précipitations au Nord-Est algérien dans un contexte de changement

climatique perturbé par les activités anthropiques. Pour pouvoir apporter ces éléments de réponse, trois variables descriptives des précipitations ; annuelles, mensuelles et le nombre de jours pluvieux par an, ont été définies et extraites des chroniques journalières de 22 stations ayant 33 années d'observations.

Ce travail a pour objectif principal de contribuer à une meilleure connaissance de la variabilité spatio-temporelle des précipitations au Nord-Est algérien. Les objectifs de cette étude sont :

- révéler les caractéristiques statistiques des précipitations des 22 stations étudiées ;
- détecter et estimer l'ampleur des tendances dans les séries chronologiques annuelles, mensuelles et le nombre de jours pluvieux ;
- identifier les ruptures climatiques dans les séries pluviométriques ;
- identifier les régions cohérentes de même variabilité pour déterminer les années très humides et les années très sèches, sur une période de 33 ans (1978-2010) dans le Nord-Est algérien.

Ces résultats vont permettre d'obtenir plus d'informations pour comprendre le comportement des précipitations à l'échelle locale et régionale au cours de ces dernières années dans la région d'étude. Cette analyse aidera aussi à la gestion efficace des ressources en eau et améliorera l'efficacité de la restauration et de la régénération de la végétation.

Cette étude a pour ambition d'apporter une contribution climatique ; analyser la variabilité des précipitations au Nord-Est algérien. Cette variabilité pluviométrique est préoccupante, tant pour le développement économique (énergie, agriculture, environnement) que pour le devenir des populations (sécurité alimentaire, eau potable). Afin de répondre aux objectifs de cette recherche, le travail a été organisé et présenté en sept (07) chapitres comme suit :

Un premier chapitre qui est une synthèse bibliographique sur le changement climatique et l'évolution des régimes pluviométriques dans le monde, la région méditerranéenne, les pays Maghrébins et surtout en Algérie. C'est une analyse et une interprétation sur la base des études réalisées pour cerner les différents aspects liés à la variabilité pluviométrique en Algérie.

Le deuxième chapitre rassemble l'ensemble des informations et données acquises pour cette étude. Dans ce chapitre, nous présentons le milieu physique de l'étude, le relief, la végétation, et les données qui ont pu être collectées pour mener cette étude.

Un troisième chapitre est consacré à l'étude de la base des données. Une vérification et un contrôle des données pluviométriques, puis la critique et la vérification de l'homogénéité des séries pluviométriques annuelles, pour validation et exploitation ultérieure.

Le quatrième chapitre porte sur la variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles au Nord-Est algérien ; la vérification du caractère aléatoire des séries, l'estimation des caractéristiques statistiques des précipitations annuelles, et l'analyse de la variabilité par des tests de tendance et de rupture.

Dans le cinquième chapitre, est présentée la variabilité spatio-temporelle du nombre de jour de pluie par an au Nord-Est algérien. L'analyse a été basée sur une base de données récente et dont la qualité est contrôlée, composé de 14 séries de précipitations quotidiennes. On procédera par la même méthodologie que le chapitre précédent.

Le sixième chapitre est une contribution à la connaissance du comportement des précipitations (signe et magnitude) observées au Nord-Est algérien pendant la période 1978-2010 sur une échelle mensuelle.

Le dernier chapitre (7) est consacré à l'identification des régions homogènes de même variabilité pour déterminer les années très humides et les années très sèches sur la région du Nord-Est algérien pour la période 1978-2010, en utilisant l'analyse en composantes principales avec rotation de type Varimax (ACPR) et la classification ascendante hiérarchique (CAH).

Enfin, la conclusion propose un résumé des principales avancées de ce travail et des perspectives qu'il ouvre pour la suite.

Chapitre I : Changement climatique et évolution des régimes pluviométriques

I.1. Variabilité du climat et changement climatique

Le climat joue un rôle décisif dans la vie et les moyens d'existence de l'être humain et dans le développement socioéconomique dans son ensemble. Il correspond au temps moyen sur une période donnée et, éventuellement, dans une région géographique donnée. D'après l'organisation météorologique mondiale (O.M.M), le climat est défini comme étant la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère (OMM, 2007).

L'examen de différentes recherches révèle une variabilité quelle que soit la durée considérée : jours, mois, saisons, années, siècles. Récemment, les causes de ces variations étaient complètement naturelles. Elles comprenaient la dynamique chaotique propre au système climatique, ainsi que l'évolution du rayonnement solaire, de la circulation océanique et de la réflexion de la surface de la Terre. Des phénomènes aussi variés que la dernière période glaciaire (achevée il y a 10 000 ans) et les fluctuations à court terme imputables à l'oscillation australe El Niño (qui dure en général plusieurs mois et se produit tous les deux ans) sont des exemples de changements naturels du système climatique (Agrawala, 2006).

L'activité humaine a superposé à cette variation climatique naturelle complexe une évolution relativement récente appelée changement climatique d'origine anthropique, également appelé réchauffement planétaire. Plusieurs experts mondiaux, s'accordent désormais à penser que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) depuis l'aube de la révolution industrielle exerce bel et bien une influence sur le climat, qui aurait commencé à se faire sentir dans le courant du XXe siècle, et une accélération du réchauffement climatique depuis 1975 (GIEC, 2007). Cependant, il est difficile de dissocier variabilités et changements climatiques. Ainsi, toute variation significative ou modification du climat, qu'elle soit naturelle ou due aux facteurs d'origine anthropique, est considérée comme étant variabilité et changements climatiques.

Le réchauffement de notre planète dû à l'émission de gaz à effet de serre (GES) est maintenant confirmé, la concentration atmosphérique de CO₂ a augmenté de façon significative, au cours du siècle dernier, ce qui a entraîné une augmentation de la température moyenne de la planète de 0,74 °C par rapport à l'ère préindustrielle

(CCNUCC, 2007). Selon le rapport de l'IPCC en 2013, le climat mondial montre une tendance au réchauffement d'environ 0,89 °C pour la période s'étendant de 1901 à 2012, et il a principalement attribué les facteurs anthropiques comme cause principale. Des études ont indiqué que l'accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère entraîne un réchauffement de la planète et intensifie le cycle hydrologique global. (Brutsaert et Parlange, 1998)

En raison de ses impacts sur l'environnement et les besoins humains (l'agriculture, la sylviculture, l'énergie, et les loisirs), le changement climatique est déjà considéré comme l'un des principaux défis auxquels l'humanité est confrontée (Obot *et al.*, 2010). Pour cela, il a suscité l'intérêt des scientifiques, des chercheurs, des planificateurs et même des politiciens. L'intérêt pour le changement climatique s'est accru au cours des trois ou quatre dernières décennies, en partie en raison de l'augmentation persistante du réchauffement climatique associé à l'effet de serre. (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003).

Le changement climatique désigne la grande variation du climat des moyennes se déroulant sur une période de plusieurs décennies, voire plus. (Gocic et Trajkovic, 2013). Les moyennes annuelles, saisonnières, et mensuelles à long terme des variables climatiques, en particulier la température et les précipitations, ont été fréquemment, utilisés comme indicateurs pour l'évaluation de la variabilité et du changement climatique. L'étude de la variabilité et l'analyse des changements climatiques à long terme des variables climatiques, en particulier les précipitations, la température et le débit des rivières, dans différentes parties du monde, a reçu un nombre croissant d'attention de la part des communautés internationales lors de la dernière décennie. Cependant, Il est largement admis que les changements des conditions climatiques, en particulier les précipitations et la température, influencent le cycle hydrologique et, par conséquent, les systèmes de ressources en eau (IPCC, 2013).

La région méditerranéenne est probablement plus sensible au changement climatique car, géographiquement, elle se trouve dans une zone de transition entre le climat chaud et sec de l'Afrique du Nord et le climat froid et humide des masses d'air arrivant du nord de l'Europe (Goubanova et Li, 2007). En raison de ces caractéristiques, même des modifications relativement mineures de la circulation atmosphérique générale, tel que des changements dans l'emplacement des trajectoires des tempêtes des latitudes moyennes ou des cellules de haute pression subtropicales, peuvent causer des changements substantiels du climat méditerranéen. Ce qui fait de la Méditerranée une région

potentiellement vulnérable aux changements climatiques, qui sont induits par l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre (Lionello *et al.*, 2006 a ; Ulbrich *et al.*, 2006). En effet, la région méditerranéenne a connu d'importants changements climatiques dans le passé (Luterbacher *et al.*, 2006) et la région été considéré comme l'un des "hot spot" les plus importants dans les futures projections de changement climatique (Giorgi, 2006). Elle est principalement vulnérable où les changements seront marqués en termes d'augmentation des températures et de diminution des précipitations moyennes, de variabilité interannuelle et d'événements extrêmes (Douguédroit et Nourant, 2003). En Afrique du Nord, l'augmentation des températures est conforme à la situation mondiale. La hausse des températures minimales est cependant plus perceptible dans cette partie de la méditerranée. (Nouaceur *et al.*, 2013 ; Donat *et al.*, 2013)

I.2. Évolution des régimes pluviométriques

Les précipitations sont probablement la composante la plus importante du cycle hydrologique affectant les ressources en eau nécessaires aux diverses utilisations des terres et à la conservation de la nature, et l'une des variables clés pour détecter la variabilité et le changement climatique régional (Cannarozzo *et al.*, 2006 ; Obot *et al.*, 2010).

L'évaluation des changements dans les précipitations suscite un grand intérêt en raison de leur importance pour les activités économiques telles que la production d'énergie, l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable, et de leur rôle dans les risques naturels tels que les inondations, les sécheresses, les glissements de terrain, et l'érosion. Les deux principales orientations de la recherche sur le changement des précipitations sont : (i) la simulation des précipitations selon différents scénarios futurs, afin d'évaluer l'ampleur et la distribution spatiale des changements attendus, et (ii) l'analyse des données climatiques historiques pour estimer les schémas spatiaux et les causes de la variabilité des changements temporels. (Lopez-Moreno *et al.*, 2010). Ces dernières années, de nombreuses études ont analysé l'évolution des précipitations régionales et nationales, sur des périodes différentes, afin d'améliorer la planification et la gestion durable des ressources en eau dans le monde entier, par exemple en région méditerranéenne (Giorgi et Lionello, 2008), États-Unis (Joseph *et al.*, 2000 ; Prat et Nelson, 2014), en Inde (Duhan et Pandey, 2013), et au Moyen-Orient (Soltani *et al.*, 2012).

En région méditerranéenne, située en zone subtropicale semi-aride, la pluviométrie est le facteur climatique dominant, étant d'une part généralement insuffisante, et d'autre

part beaucoup plus variable que la température. La forte variabilité interannuelle des précipitations est l'une des caractéristiques les plus importantes du climat méditerranéen (Lionello, 2012). Pour cela, de nombreuses études ont été menées pour évaluer l'évolution régionale des précipitations de certains pays méditerranéens.

Cependant, lors d'une étude, menée par Philandras *et al.* (2011), des tendances et de la variabilité des précipitations annuels et des jours de pluie annuels dans la région méditerranéenne, les résultats de l'analyse ont montré que des tendances négatives statistiquement significatives des totaux annuels de précipitations existent dans la majorité des régions méditerranéennes au cours de la période 1901-2009, à l'exception de l'Afrique du Nord, du sud de l'Italie et de l'ouest de la péninsule ibérique, où de légères tendances positives (non statistiquement significatives) apparaissent. En ce qui concerne le nombre annuel de jours de pluie, une diminution prononcée de 20 %, statistiquement significative, apparaît dans les stations météorologiques représentatives de la Méditerranée orientale, tandis que les tendances sont insignifiantes pour la Méditerranée occidentale et centrale.

Pour Norrant (2004), dans sa recherche des tendances significatives des totaux de pluie régionaux mensuels et saisonniers du Bassin méditerranéen entre 1950 et 2000, a montré que les précipitations diminuent significativement dans le golfe de Gênes en décembre, en Grèce en janvier, hiver et saison pluvieuse, au Moyen-Orient en hiver et en région atlantique en mars, et augmentent significativement dans le golfe de Gênes en avril, en relation étroite avec l'évolution du nombre de jours de pluie. En Espagne méditerranéenne en octobre les totaux diminuent significativement en lien avec la moyenne journalière des précipitations. Les réductions significatives des précipitations sont particulièrement en relation avec les configurations atlantiques et méditerranéennes.

Dans une étude récente pour appréhender les caractéristiques spatio-temporelles des phénomènes pluviométriques à l'échelle du bassin méditerranéen de 1950 à 2013, Raymond *et al.* (2016) ont constaté une diminution du cumul de pluie, durant la période de septembre à avril, quasi-généralisée à l'ensemble du bassin méditerranéen. De plus, le bassin méditerranéen connaît une baisse du nombre de jours de pluie particulièrement marquée dans le nord du Portugal et de l'Algérie, au sud-ouest et sud-est des Balkans, au nord-est de l'Anatolie et sur une majeure partie de l'Italie.

L'évolution des précipitations témoignent des bouleversements climatiques que subit ces dernières années l'Afrique du Nord et le Grand Maghreb. (Stour et Agoumi, 2009 ; Nouaceur *et al.*, 2013). En effet, Plusieurs études pluviométriques pour différentes

régions et bassins hydrologiques se sont intéressées à l'évaluation des précipitations au pas de temps annuel et mensuel en vue d'une analyse hydrométéorologique de cette variable. Dans une étude réalisée par Trambly *et al.*, 2013, pour une évaluation régionale (Maroc, Algérie, et Tunisie) des tendances des précipitations, les résultats ont montré une forte tendance à la diminution des précipitations annuelles et du nombre de jours de pluie, ainsi qu'une augmentation de la durée des périodes de sécheresse, principalement pour le Maroc et l'ouest de l'Algérie.

En Tunisie centrale, pour Kingumbi *et al.* (2000), l'étude de la variabilité annuelle, a mis en évidence une baisse de la pluviométrie entre 1976 et 1989, en utilisant la méthode de la variable centrée et réduite. Mais l'utilisation des tests statistiques n'a pas révélé de rupture de stationnarité dans les séries chronologiques considérées. Pour Jemai *et al.* (2016), l'analyse des séries chronologiques des données de précipitations mensuelles et annuelles enregistrées dans, au sud-est de la Tunisie, en se basant sur les valeurs de l'indice standardisé des précipitations (SPI), pour la période 1987-2012, a montré que les années humides se situent en 1989-1990, 1995-1996 et 2006-2007, tandis que les années sèches sont les suivantes : 1987-1988, 1996-1997, 2000-2001, 2001-2002, 2007-2008, 2008-2009 et 2009-2010. Cela montre l'existence d'une forte tendance à la baisse des précipitations et d'importantes séquences de sécheresse. Cette distribution des précipitations varie en fonction de la latitude, de la longitude, de la topographie et de la proximité de la mer Méditerranée.

L'analyse d'un possible début de changement du régime des pluies au cours des six dernières décennies, durant la période de 1950 à 2010 en Tunisie, mené par Hlaoui et Henia (2015), a montré l'absence de tendance significative à la hausse ou à la baisse de la pluviométrie en Tunisie et l'absence de signal d'un quelconque changement dans le régime pluviométrique. En évaluant l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Tunisie, Nefzi (2012) a pu conclure l'absence de tendance dans les données sur les précipitations annuelles, et l'existence d'une tendance significative des précipitations dans quelques stations, pour les saisons d'été et de printemps (échelle saisonnière), et pour les mois de janvier, mars, juin, juillet, août, septembre et décembre (échelle mensuelle), pour la période 1970-2007.

Le Maroc, par sa position géographique (le Nord-Ouest du continent africain) et son exposition à l'influence de l'océan atlantique, la variabilité des précipitations est grande. En plus, la présence et l'orientation des chaînes montagneuses de l'Atlas et du Rif

accentuent cette variabilité. Ceci a mené plusieurs scientifiques à étudier cette variabilité et les causes possibles. Fniguire *et al.* (2017), en analysant la variabilité des précipitations dans la région semi aride (bassin de Tinsift) pendant la période 1929 - 2010, a montré l'évolution des quantités de pluie représentant les cycles humides avant 1975, suivie d'une longue période de sécheresse entre 1975 et 2004, et que la variabilité interannuelle des précipitations s'accompagne de changements de stationnarité dans la série des précipitations.

La variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional pour la période 1935-2004, a été sujette à une étude par Sebbar *et al.* (2011). Les résultats ont montré que la période de rupture se situe entre 1968 et 1984 et la région orientale a subi la plus importante réduction pluviométrique, et les deux sous-régions « Atlantique septentrionale » et « tangéroise » ont enregistré une réduction moins importante. Par application de l'indice pluviométrique standardisé, une phase déficitaire s'observe avant 1956, une phase normale a excédentaire jusqu'en 1970. Après cette date, la réduction de la pluviométrie s'est observée d'une manière significative.

L'étude de l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques climatiques de la région du Centre du Maroc, en utilisant l'ACP, a montré une tendance à la baisse de la pluviométrie, notamment les pluies d'hiver et de printemps. Cette variabilité pluviométrique de la région Centre du Maroc s'organise selon trois composantes principales, à savoir l'altitude (reliefs), la saisonnalité et la latitude/longitude, complétée par la proximité de l'océan (Sebbar *et al.*, 2012).

Pour Singla *et al.* (2010), dans une étude des régimes hydro-climatiques sur 27 bassins marocains, la baisse des pluies est généralisée et soulignée par une rupture dans les séries chronologiques entre 1976 et 1980, excepté dans la région entre Rif et Méditerranée, où les pluies montrent une tendance à une hausse relative depuis les minimums des années 1980. Mais aucune tendance n'est décelée dans une majorité des régions sahariennes. Le même constat a été trouvé par Driouech (2010), en étudiant les tendances et l'évolution des précipitations, où elle a constaté une forte variabilité interannuelle des précipitations et une augmentation de la fréquence des sécheresses depuis le début des années 1980, la distribution des précipitations au Maroc a bien connu un changement durant la période 1961-2008. La baisse des précipitations serait accompagnée d'une diminution du nombre de jours pluvieux et du nombre d'événements de fortes précipitations.

L'Algérie est l'un des pays Nord africains les plus touchés par les effets de variabilité et changement climatique, qui a causé des pertes économiques considérables, au cours des dernières décennies. Pour cela différentes études de l'évolution spatiale et les tendances temporelles des précipitations ont été menées sur l'ensemble ou une partie du pays.

Dans l'Ouest du pays, plusieurs auteurs affirment que cette région a été le lieu, dès la fin des années 1970, d'une sécheresse caractérisée par une sévérité, une ampleur et une persistance du déficit pluviométrique remarquables. Cependant, Khaldi (2005) dans son étude de l'impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains de l'Ouest algérien pour la période 1968-1998, avait localisé une modification du régime pluviométrique durant la décennie 1970-1980 pour la plupart des stations pluviométriques étudiées, et que se sont les pluies d'hiver et de printemps qui ont enregistré une rupture dans les séries chronologiques durant la décennie 1970-1980. A l'échelle mensuelle, il a remarqué que les mois qui enregistrent les baisses les plus significatives sont décembre, janvier, mars et avril. Ces résultats sont approuvés par plusieurs études. En effet, Meddi et Meddi (2009), pour la période 1940-2004, avaient constaté que la baisse de la pluviométrie était marquée pendant le milieu des années 1970, et que la réduction s'élève à plus de 36 % dans la région de Ghriss et à l'extrême ouest de l'Algérie. Ghenim et Megnounif (2013), en analysant les précipitations dans le Nord ouest ont pu mettre en évidence une rupture localisée principalement entre le milieu et la fin des années 1970. Le déficit pluviométrique observé est estimé entre 23 et 36 %. Récemment, Hallouz *et al.* (2019), en analysant les tendances des précipitations dans le bassin versant de l'oued Mina dans le Nord-Ouest algérien pendant la période de 1979 à 2013, ont constaté une tendance décroissante du total annuel des pluies. En revanche, des séquences des jours secs consécutifs, des intensités des pluies et des jours extrêmement pluvieux ont significativement augmenté dans le temps.

Une régionalisation climatique des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale, a été réalisée par Medjerab et Henia (2005) sur des données pluviométriques de 220 stations pour la période 1942-1990, en utilisant l'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Factorielle Discriminante. Ils ont mis en évidence la présence de quatre régions homogènes. Cette distribution géographique des pluies annuelles est influencée par plusieurs facteurs ; l'altitude, la position du relief par rapport à la mer, la morphologie et l'orographie.

Dans l'Est algérien, les recherches sur la variabilité et les tendances des précipitations sont nombreuses ces dernières années. Dans le bassin de la Medjerda, l'analyse réalisée par Khoualdia *et al.* (2014), pour des périodes allant de 19 à 38 ans, a révélé une tendance à un retour des précipitations remarquée pour la période (2001-2007). À l'échelle mensuelle, les précipitations ont augmenté significativement après les années de rupture pour les mois d'hivers et du printemps, à l'exception du mois de mars.

En menant une étude dans le bassin versant de Seybouse, Khezazna *et al.* (2017), ont indiqué une importante fluctuation interannuelle des précipitations et une tendance à la hausse significative, en analysant les données des précipitations annuelles en termes de variabilité et des tendances, pour la période 1970-2011. Dans le même bassin versant, Balah et Amarchi (2016), pour la période 1946-2009, ont constaté des ruptures sur toutes les séries des pluies, majoritairement sur le Nord-Est du bassin. Contrairement à la partie Sud qui est moyenne, indiquant que 56% d'ensemble des stations ont une tendance à la hausse.

Récemment, Mrad *et al.* (2018) en analysant les tendances des précipitations annuelles et saisonnières au Nord-Est algérien, pour la période 1969-2012, ont montré que spatialement les précipitations annuelles augmentent avec l'altitude, mais qu'elles sont plus élevées pour les stations exposées à des vents humides. Elle augmente également d'est en ouest et diminue inversement au fur et à mesure que l'on se déplace loin de la côte au sud. La méthode statistique a montré qu'il y a des tendances à l'augmentation des précipitations à l'échelle annuelle dans certaines stations de haute altitude et dans les stations côtières pendant la saison hivernale.

Dans les hauts plateaux et le Sahara algériens, Talia *et al.* (2011), en caractérisant les variations spatio-temporelles de la pluviométrie annuelle pour 71 stations réparties dans cette région, et en appliquant l'analyse en composantes principales (ACP) avec rotation et des tests de rupture et de stationnarité, ont constaté qu'aucune rupture significative n'est enregistrée à l'Est des hauts plateaux et dans l'extrême-Sud du Sahara malgré la tendance à la diminution des précipitations annuelles. Tandis qu'à l'ouest et au centre des hauts plateaux une chute brutale de la pluviométrie au cours de la décennie 1970-1980 est observée.

La partie Nord algérienne a fait l'objet de quelques études de la variabilité des précipitations. Taïbi *et al.* (2013), en étudiant l'évolution et la régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009), ont constaté que la baisse significative des précipitations est observée dans la région Ouest, à partir de la moitié des années 70

particulièrement. A l'Est, aucune diminution du régime pluviométrique n'est observée. La régionalisation a mis en évidence six régions qui présentent un comportement différent du régime pluviométrique sur la période d'observation 1936–1937/2008–2009. Une étude plus récente, celle de Zerouali *et al.* (2020), en analysant les données des précipitations annuelles au cours de la période 1920-2011, afin de détecter des points de changement et des tendances dans les séries de précipitations du nord de l'Algérie. Les résultats obtenus montrent une tendance à la baisse significative a été détectée à partir des années 1970, avec une période relativement humide entre les périodes 1950-1970 et 2001-2011. Cette dernière est observée en particulier dans les stations centrales et orientales.

Les résultats de l'analyse de la variabilité et la tendance des précipitations quotidiennes maximales annuelles en nord de l'Algérie menée par Ghenim et Megnounif (2016), montrent que les caractéristiques des PQMA révèlent une forte irrégularité temporelle et ont une fréquence de ces incidents est très élevée en novembre et décembre, et leur intensité maximale en octobre. Le phénomène observé était si irrégulier qu'il n'y avait pas de saison dominante et que la survenance d'un événement extrême peut arriver à n'importe quel période de l'année. Les tendances des PQMA ont montré que six des 35 stations ont une tendance significative. Pour les autres stations, aucune tendance claire n'a été observée.

Chapitre II : Situation géographique, Reliefs, végétation naturelle, et réseau hydrographique au Nord-Est algérien

II.1. Localisation géographique

La région d'étude est le Nord-Est algérien, avec une superficie de 83372 Km. Cette zone est située entre 36°54 et 34° 48 Nord latitude et 8° 27 et 5° 4 Est de longitude. Elle est limitée à l'est par la frontière Algéro-tunisienne, à l'ouest par la vallée d'oued Soummam et les monts des Babors, au sud par le piedmont de l'Atlas saharien, et au nord par la rive sud de la mer Méditerranée (figure 1).

Notre zone d'étude, par sa position, contact entre la mer méditerranée et le continent africain, est considérée comme une zone de passage et de transition climatique entre le domaine tempéré au nord de la méditerranée et le climat africain subtropical (Lionello et al., 2006 ; Giorgi and Lionello, 2008 ; Merzougui et Slimani, 2012). Cette position de frange explique également une dégradation théorique graduelle en latitude du littoral au Sahara. Mais l'interposition des 02 vastes bourrelets montagneux ; l'Atlas tellien orienté est-ouest et l'Atlas saharien orienté sud ouest – nord-est, entre les deux modifie l'ordonnancement général du climat. D'une façon générale, le Nord-Est algérien est soumis à l'influence conjuguée de la mer, du relief, et de la latitude, elle offre une grande variété de climats qui deviennent de plus en plus chauds et secs quand on s'éloigne de la mer. Cependant, le climat du Nord-Est algérien (dans la figure 1) présente trois régions climatiques, du Nord au Sud : a) le littoral et le versant Nord de l'atlas tellien avec un climat humide à subhumide ; b) le versant Sud de l'atlas tellien, les hauts plateaux, et le versant Nord de l'atlas saharien sont caractérisés par un climat semi-aride ; c) le versant sud de l'atlas saharien et son piedmont présentant un climat aride à saharien.

II.2. Reliefs

L'organisation du relief de la zone d'étude, depuis les plaines littorales du Tell jusqu'à la dépression du Sahara septentrionale, est très diversifiée. Elle est constituée de 06 grandes unités physiques disposées du nord au sud :

II.2.1. Les plaines littorales

Elles constituent une bande discontinue, qui borde la mer méditerranée et fragmentée par quelques monts, qui s'étale de la mer méditerranéenne jusqu'à la chaîne numidique au sud.

Dans la partie Ouest, ces formes sont peu nombreuses, et peu étendues ; ce sont les plaines de Collo et de Skikda. En revanche, dans la partie Est un large croissant de plaine, long de 100 Km s'étale autour de Djebel Edough, depuis la forêt de Guerbes jusqu'à la région de Boutelja. C'est là une succession de paysages variés avec des dunes sableuses dans le Guerbes, le lac Fetzara, la plaine d'Annaba, et les marais de la M'khada (Marre, 1987). Il s'agit partout ailleurs de petites plaines côtières correspondant aux basses vallées des oueds : Skikda (Oued Safsaf), Collo (Oued Guebli), El Ancer-Belghimouz (Oued El Kébir), Jijel (Oued Djendjen) et Souk El Tenine (Oued Agrioun) (Mebarki, 2005). Pour Marre (1987), les vraies plaines sont toujours littorales et correspondent aux débouchés des oueds.

Ces formes ont une situation favorable aux vents du Nord et Nord-Ouest souvent humides.

II.2.2. L'Atlas tellien et les bassins intérieurs

L'Atlas tellien se présente comme un bourrelet longeant et dominant la mer méditerranée depuis Bejaia jusqu'à la frontière tunisienne. C'est une chaîne longue de 300 Km mais large seulement de 50 à 80km suivant les secteurs (Marre, 1987).

L'Atlas tellien est composé de plusieurs massifs, d'Ouest vers l'Est, on trouve le massif de la petite Kabylie constitué par la chaîne des Babors, qui débute vers l'ouest à la vallée de la Soummam et se termine à l'est, au niveau de l'oued Djenjen et du massif d'El Ouana. Constituée par une série de chaînons sensiblement parallèles orientés N.E-S.W. Les altitudes restent modestes ; le Djebel Babor (2004m), point culminant de la chaîne.

Lorsqu'on se déplace vers l'Est, les altitudes décroissent rapidement. Ainsi au-delà de la vallée de l'oued Rhumel, on trouve un ensemble de sommets alignés d'Ouest en Est qui est la chaîne Numidique, qui vers le sud, descend vers les hautes plaines constantinoises ou, par endroit elle est relayée par le Djebel Chettaba (1316m) et Djebel Ouash (1282m) et Djebel Mahouna(1411m). Sur cette chaîne se trouve les escarpements les plus hardis, les sommets les plus aigües, sont Kef Sidi Driss (1273m) et les deux Kefs Toumiet(883 m).

Plus à l'Est le massif de l'Edough est nettement isolé de la chaîne tellienne et présente une bande sub-littorale, sa ligne de crête rectiligne débute de Koudiat El-Rocha (616m), passe par Kef Seba (1008 m) le point culminant, et redescend vers Seraidi.

Les bassins intérieurs sont encastrés entre les monts de l'Atlas tellien. Les plus importants sont ceux de Guelma, Mila, Soummam. Ces bassins sont composés de glacis qui encadrent presque tous les milieux naturels du constantinois, composés de plusieurs

niveaux étagés ou emboîtés et plus ou moins encroûtés. La région de Mila se caractérise par un espace géographique très diversifié avec un relief complexe et irrégulier et profondément disséqué par un réseau hydrographique dense. Ses plaines intra montagneuses ont une altitude moyenne de 400m. Plus à l'est la région de Guelma qui est caractérisée par un relief fortement montagneux, dont les plus importants sont Djebel Mahouna(1411m) et Djebel Houara (1292m).

II.2.3. Les hautes plaines

Elles se présentent comme un large boulevard tendu d'Ouest en Est en travers l'Algérie orientale, entre les deux alignements du Tell au nord et les monts de Hodna – Aurès -pays Nememcha au sud.

Sur le plan topographique, elles constituent un ensemble homogène, dont l'altitude moyenne est de 800 mètres, accidentées par des collines qui les partagent en nombreux petits bassins particuliers (Cote, 1998).

Les hautes plaines constantinoises offrent un type de hautes plaines aux horizons plus coupés, formés de larges fonds synclinaux aux reliefs érodés. A l'ouest (Sétif) et plus à l'est (Tébessa) plus souvent dans le plancher rocheux, et isolant des reliefs anticlinaux de moins en moins discontinus vers le Nord-Est ou, s'accolant au tell.

La présence de quelques dépressions fermées forment des chotts, des sebkhas, et des garaets est à signaler, favoriser par l'accumulation des eaux provenant des versants des deux Atlas (Tellien et Saharien), surtout celle de Ain M'lila.

II.2.4. L'Atlas saharien

C'est un ensemble de massifs volumineux mais relativement ouverts, dominant vigoureusement au Sud la cuvette jalonnée de chotts (Mebarki, 2005).

Les monts des Aurès appartiennent au système de l'atlas Saharien, dont les principaux sommets culminent à plus de 2000m : Djebel Chelia (2328m), Djebel Mahmel (2321m) et Bélazma (2094m). Elles sont constituées par une série de plis parallèles orientées Sud-ouest –Nord-est, s'étendant sur une soixantaine de Km. La dissymétrie entre les profils transversaux est la caractéristique principale de ces massif montagneux : flancs septentrionaux humides et boisés et flancs méridionaux moins humides et peu boisés.

A l'est, les monts de Nememcha continue l'Aurès par ses alignements Sud-ouest-Nord-est, caractérisés par leurs forts retombés sud.

A l'ouest, le massif de Boutaleb (1890 m) extrêmement accidentés avec ses lignes de crêtes formées : par Djebel Afgane, Djebel Chehelou, et Djebel Tafliont. Ce massif constitue un maillon important dans la suite de la chaîne des Aurès.

II.2.5. Le piedmont sud de l'Atlas saharien

Sur le flanc méridional de l'Atlas saharien, s'étendent à perte de vue de vastes plaines dont la nudité annonce l'aridité dominante. C'est le domaine du Bas-Sahara, jalonné par une série d'oasis (région des Ziban), qui doivent leur présence à l'exploitation de nappes souterraines (Mebarki, 2005). Il se présente comme une zone de transition entre deux domaines distincts, aussi bien du point de vue géomorphologique, que géologique ; le domaine atlasique et montagneux du nord, et le domaine des plaines sahariennes qui se trouvent au sud.

Le chott Melrhir qui constitue le point le plus bas de l'Algérie (-34 m d'altitude), reçoit les eaux des oueds drainant les versant sud des Aurès-Nememcha, et l'Oued Djedi qui reçoit les eaux de la partie occidentale de Djebel Amour en amont de Laghouat (Guidoum, 2017).



Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.

II.3. Contexte orographique

Schématiquement, la carte altimétrique, établie et représentée par la figure 2, montre que l'altitude moyenne est de 0 à 300 m, est observée sur les plaines côtières et le Piémont saharien, entre 600 et 900 sur les hauts plateaux et plus de 1000 m sur les massifs élevés du l'Atlas tellien. Entre 300 et 600 m dans le Hodna, 900 et 1200 m est représentée sur les hautes plaines de Setif et celles de Khenchela. 1500-1800 m dans la l'Atlas saharien et les monts des Babors et Tababart, et enfin moins de 0 m dans le Sud saharien. Pour Mebarki (2005), les reliefs ont des altitudes qui ne sont guère très élevées en valeur absolue mais se singularisent par leur fort gradient altimétrique (entre Djebel Chélia et la haute plaine de Remila, la dénivellation atteint 1 200 m ; du haut de ses 1 462 m, Djebel Mcd Aicha domine la vallée de l'oued Kébir de plus d'un millier de mètres...).

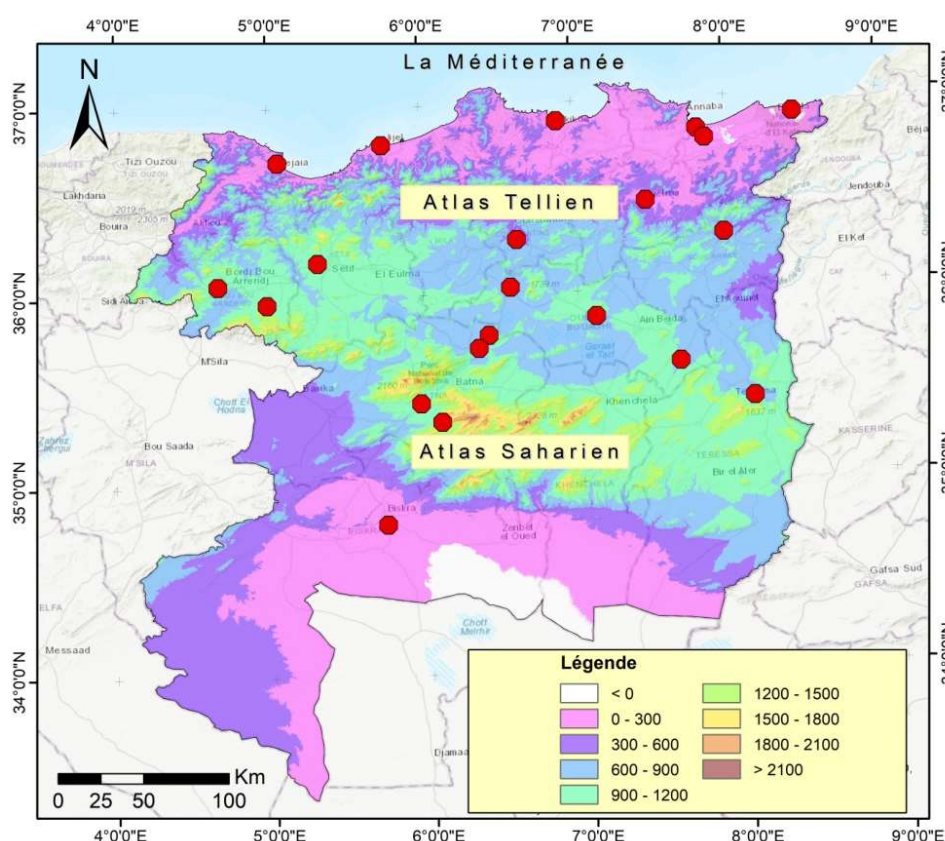


Figure 2: Carte altimétrique de l'Algérie orientale ; source : propre élaboration

II.4. Géologie

Du nord au sud, on distingue les formations suivantes : Les monts de la petite Kabylie et de la chaîne Numidique sont prédominés par des sols tendres : marneux, argileux et schisteux, les terrains sédimentaires empilés sur grandes épaisseurs au cours des ères secondaires et tertiaires ont été fréquemment soulevés et plissés (WOJTERSKI, 1985 in CHERMAT, 1998).

- Les Babors constituent la chaîne la moins récente avec des sols marneux sur les parties élevées et sur les flancs nord, ailleurs c'est du calcaire (GHARZOULI, 1989). A l'Est du prolongement de cette chaîne, les massifs de Tamzguida, Taza et Guerrouche sont prédominés par des argiles, des grès et une série de dépôts de marnes schisteuses.
- Le Djebel Edough appartenant à la série de ce prolongement, correspond aux affleurements de formations cristallophylliennes. Cette chaîne est essentiellement constituée de gneiss.
- Le second système montagneux (Monts de Sétif et de Constantine), constitue un maillon très important du tell intérieur. Selon Glaçon (1967) cette région a subi des mouvements orogéniques alpins à la fin du Tertiaire et du début du Quaternaire. Ce système est constitué par les monts suivants :
 - Le Djebel Chettabah dont le substrat géologique date de l'ère secondaire, est constitué par une épaisse formation marneuse.
 - A l'ouest les monts de sétif, vieille chaîne de grès crétacé est aplatie, présente de puissantes assises de grés à la base et du calcaire marneux sur les crêtes.
 - Les Djebels Tafat, Anini et Maghress sont formés par la succession des alluvions récentes et anciennes et parfois des éboulis à blocs des terrains miocènes de nature marneuse et argileuse.
 - Les hautes plaines Sétifiennes, argileuses au nord et calcaires au sud, sont caractérisées par des sols essentiellement marneux et dolomitiques.
 - Le massif de Boutaleb est presque entièrement du crétacé inférieur, caractérisé par des sols bruns calcaires.
 - Les massifs du Hodna, de Bellezma et de l'Aurès, régions d'Oum El Bouaghi et d'Ain Beida, Monts de Souk Ahras et plus au Sud, représentée par les djebels d'El Ouasta, de Ouenza-Boukhadra, de Mesloula, etc... Ces

formations à dominance carbonatée sont d'une assez grande homogénéité, du Lias au Crétacé moyen. (Mebarki, 2005)

II.5. Végétation

Les paysages végétaux du Nord-Est algérien correspondent en grande partie à celles des régions climatiques. L'effet des précipitations est déterminant, mais interviennent également d'autres facteurs comme la nature du sol, le relief et l'action anthropique. Les feux, exploitation inconsidérée des pâturages, abattage des forêts, mise en culture vont porter un coup fatal aux forêts algériennes, au profit des zones herbeuses, comme la steppe. En plus, les régions steppiques subissent un stress croissant qui engendre une dégradation des états de surface. La physionomie des formations végétales se modifie d'une manière générale du Nord vers le Sud.

D'après la figure 3, nous avons essayé de déterminer les surfaces occupées par chaque type de végétation à partir la carte du tapis végétal au 1/1000.000, feuille de Tunis Sfax (Gausson et Vernet, 1958 ; in : Mebarki, 2005)

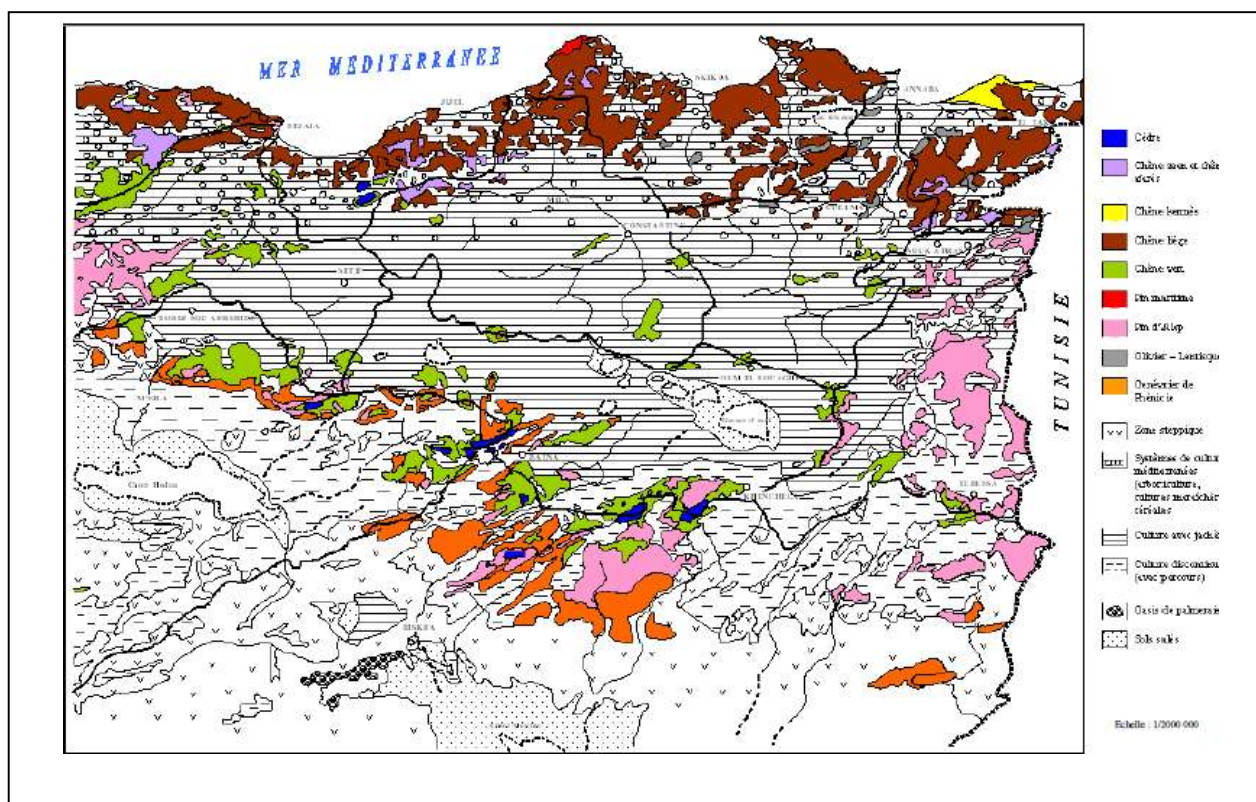


Figure 3: Couverture végétale de l'Est algérien (d'après la carte internationale du tapis végétal au 1/1000 000 feuilles Tunis-Sfax et Alger) ; in : Mebarki, 2005

II.5.1. Végétation forestière

Généralement, la répartition géographique de la couverture forestière est liée aux conditions édaphiques, orographiques, et climatiques. Le couvert forestier s'étend depuis les forêts des montagnes méditerranéennes surplombant la méditerranée jusqu'aux forêts de l'Atlas saharien.

Dans la zone tellienne, les massifs d'Edough, la Mahouna, et les assises gréseuses de la chaîne Numidique, offrent de belles forêts de chêne liège, dont le taux de recouvrement est de 70%, 40% et 35% respectivement. La zone montagneuse Oued Ghanem-Oued Medjerda comporte le pourcentage de couvert et le taux de boisement le plus élevé. (Biskra). En effet, dans les forêts du Tell, la végétation est constituée principalement de chêne-liège, chêne vert, chêne zéen, chêne afarès. On rencontre également des pinèdes (pin d'Alep, pin maritime), des maquis (genêt, ciste, bruyère, arbousier, lentisque, etc.), des garrigues (chêne kermès, palmier nain ou doum, romarin) et enfin des plantations fruitières ou fourragères d'oliviers et de caroubiers sur les piémonts des montagnes.

Dans l'Atlas saharien, les formations forestières sont constituées essentiellement des peuplements naturels à base de pin d'alep, chêne vert, genévrier de Phénicie, et cèdre, localisées sur les massifs de Belezma, Z'gag, Bou Arif et l'Aurès.

Le chêne vert domine sur le versant Nord des Aurès. En altitude, il cède place aux cédraies, qui couvrent les sommets des grands massifs telque Djebels Chélia, Lazreg, Ichemoul, Zgag et Belezma). Tandis que, les versants sud sont boisés de pin d'Alep. Les peuplements se situent entre 1 000 et 1 400 m d'altitude. On trouve aussi le Genévriers de Phénicie, qui constitue de grandes superficies, il est le stade ultime de la dégradation.

La forêt de conifère ne s'arrête pas uniquement aux espèces suscitées. Le montagnard supérieur offre asile au genre *Abies* représenté par le Sapin de Numidie qui se rencontre au niveau des hautes montagnes avoisinant l'aire du Cèdre de l'atlas.

II.5.2. Végétation steppique

Elle est localisée dans la cuvette du Hodna, une partie des hautes plaines du sud constantinois, l'Atlas saharien (les monts de Nememcha) et le piémont Sud de l'atlas Saharien (sud des Monts de l'Aurès et des Nememcha). C'est une zone tampon entre le Tell agricole au nord, et le désert du Sahara au sud. Dans le nord, en descendant le revers méridional de l'Atlas Tellien, la steppe d'Alfa (*Stipa tenacissima*) domine, et se partage avec l'espace cultivé.

La limite nord de la steppe commence avec le tracé de l'isohyète de 400 mm de précipitations / an, tandis que la limite sud est celle de 100 mm / an.

La steppe à base d'alfa et/ou de sparte se trouve sur les sols argileux à texture plus fine. L'armoïse blanche (Chih) occupe les sols argileux et limoneux. La steppe à halophytes occupe les terrains salés à proximité des chotts, situés au cœur des hautes plaines. On y trouve les solsole et aussi les atriplexes qui constituent eux aussi un bon fourrage.

II.5.3. Végétation des terres cultivées

Les arbres fruitiers (agrumes et fruitiers d'hiver) sont peu présents dans l'Est algérien (environ 20% du total Algérien). Ils se localisent surtout aux deux extrémités (Sud et Nord) et leur nombre décroît vers les hautes plaines. Les gels printaniers les excluent impitoyablement, sauf sur une étroite bordure de haut de piémont. Ensuite, de part et d'autre des Hautes Plainnes, ces fruitiers se localisent dans les bassins Sud tellien (bassin de Guelma, région de Constantine), dans les vallées méridionales des massifs du Sud : Hodna, et Aurès.

Le milieu céréaliier-jachère s'étend au Nord dans les vallées du Saf-Saf et même sur la plaine d'Annaba. Les céréales ne sont guère développées au Nord de la sierra calcaire Babor-Tababor-Sidi Driss. Au Sud, il s'étendant sur les sebakh, la limite céréalière englobe le piémont méridional du Hodna, le piémont et vallées septentrionales des Aurès, les Nemencha et les monts de Tébessa. Elle est souvent pratiquée avec la jachère qui s'impose comme un impératif technique surtout dans les hautes plaines du nord.

Ce milieu qui s'étage de 0 à 200 m jusqu'à 1000 m et plus, se développe dans des zones bioclimatiques diverses : au Nord, la zone subhumide, au Sud, la zone semiaride avec le versant méridional du Hodna. Ces différentes régions disposent d'une pluviométrie variant de 800 à 1000 mm au Nord et 200 à 300 mm seulement au Sud.

II.5.4. Végétation des oasis sahariennes

Les premières palmeraies apparaissent depuis le piémont Sud de l'Aurès (El Kantara, M'chounèche, Khangat Sidi Nadji) où elles sont à la limite de leur cadre écologique véritable. Plus nombreuses et plus à leur place sont les oasis qui parsement la région aride des Ziban (Tolga, Biskra, Sidi Okba, Zeribet El Oued...) où douceur de l'hiver et forte sécheresse hygrométriques de l'air permettent les fameuses Deglet Nour. Les cultures étagées y sont pratiquées associant palmiers et cultures au sol. De nombreux

jardins pratiquent le maraîchage intensif d'hiver et de printemps, sont développés durant ces dernières années à labri des palmiers (Mebarki, 2005).

II.5.5. Prairies naturelles

Elles ne couvrent que peu d'espace et le terme, lui-même, reste ambigu ; il comprend les merdjas (prairies humides de fonds d'oued) et terres inondables marécageuses. Ces prairies trouvent leur extension maximale dans les zones littorales où ce sont plutôt des marécages : plaine littorale de Bejaia à Souk El Tenine, bassin de Jijel, mais surtout, plaine d'Annaba ; d'autre part, au Nord des Hautes Plaines dans la zone des Sraouate.

II.6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est très encaissé et relativement court. Les débits de ces cours d'eau, très variables, se caractérisent par l'abondance et la modération de l'écoulement pendant la saison humide et très faible pendant la saison sèche (figure 4). Le nord de la région étudiée est sillonné par des oueds importants qui naissent sur les hautes plaines et rejoignent la mer en traversant le Tell par des gorges (oued Rhumel-El-kebir beni haroun, oued Safsaf à Zardezas et oued Seybous au Nador), et plus à l'ouest l'oued Djendjen et l'oued Soummam. Des cours d'eau secondaire qui naissent sur le versant nord du tell sont à signaler (oued Guebli, oued Bougues).

Au sud, dans les Aurès, le réseau hydrographique est endoréique dont l'écoulement se perd dans les dépressions intérieures et à régime quasi-temporaire. La direction des oueds fait que les uns sont sahariens comme oued El arabe, oued El abiod et oued Abdi, qui traversent le massif du nord est vers le sud ouest et s'éteignent tous dans les chotts (Abdessemed, 1981).

Généralement, un coup d'œil sur la carte du réseau hydrographique du Nord-est algérien suffit pour montrer que cette région comprend trois régions aussi différentes les unes des autres par leurs caractères hydrographiques; ce sont le Tell, les Hauts-Plateaux et le Sahara.

Cette organisation hydrographique traduit la conjonction de deux principaux facteurs, topographique et climatique, suite aux résultats de l'histoire géologique et de l'évolution paléoclimatique de la région du Nord-Est algérien. (Mebarki, 2005):

- le volume montagneux du Tell et sa pluviosité facilitent un écoulement vers la mer.

Les bassins supérieurs correspondant aux marges Nord des Hautes Plaines ont toutefois un régime qualifié de « pseudo-éxoréique » car leur écoulement libre vers l'extérieur ne fonctionne que lors des crues ;

- à l'intérieur, la topographie en cuvettes et la semi-aridité du climat favorisent un régime d'écoulement endoréique, débouchant dans des dépressions fermées de type sebkha, chott ou garâa.

Les oueds qui prennent naissance dans les djebels de l'Aurès et de Nememcha, relativement arrosés, vont s'écouler dans deux directions opposées : ceux du versant Nord rejoignent la gouttière des Hautes Plaines (une dizaine de lacs salés), ceux du versant saharien se jettent dans Chott Melrhir.

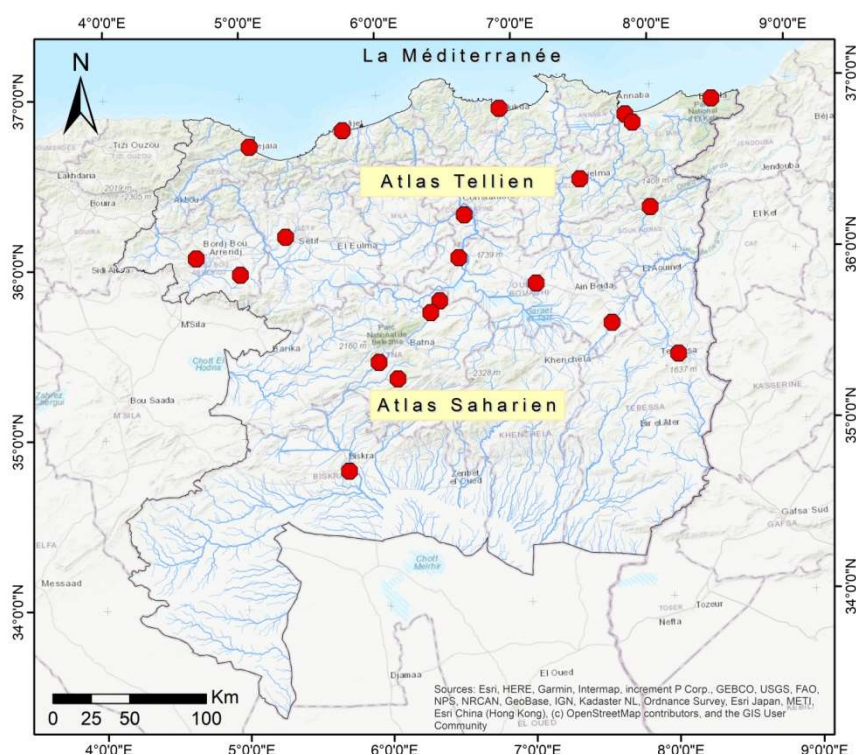


Figure 4: Réseau hydrographique de l'Algérie orientale ; source : propre élaboration

II.7. Régime des pluies au Nord-Est algérien

Le régime des précipitations est un facteur important de la productivité alimentaire, la gestion des ressources en eau, et la répartition du tapis végétal dans la région du Nord-Est de l'Algérie.

D'une manière générale, la région d'étude s'inscrit entre les isohyètes 1500 mm au nord et l'isohyète 150 mm au sud. La figure 5, qui représente la répartition des précipitations moyennes annuelles, établis par l'ANRH (1993), montre que ;

Les précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur suivant un fort gradient latitudinal, altéré néanmoins par l'effet orographique de l'Atlas saharien, avant de s'accroître à nouveau dans le Piémont saharien où les pluies se raréfient (Mebarki, 2005).

La zone la plus pluvieuse est l'extrême Nord-ouest (supérieure à 1000 mm), allant de Bejaia à Collo, et sur les altitudes les plus élevées du massif de l'Edough et les monts de la Medjerda. Généralement la variation annuelle moyenne est sensiblement la même sur le littoral et dans le Tell. En terme de typologie causale des pluies, le nord peut bénéficier des pluies des perturbations qui naissent sur la mer Méditerranée et celles qui viennent de l'Atlantique après avoir traversé l'Europe ou le Maroc, à condition d'être liées à une circulation cyclonique en altitude (Xoplaki *et al.*, 2004 ; Lionello *et al.*, 2006 ; Slimani *et al.*, 2007).

Les hauts plateaux sont caractérisés par des pluies moins abondantes et brutales, à dominante convective, et avec une occurrence principale durant le printemps et l'automne. Le Nord de ce compartiment est caractérisé par l'isohyète 500 mm, puis les pluies décroissent au fur et à mesure, ou elle atteint dans la bordure sud 350 mm. Certaines zones telles que les lacs salés reçoivent moins de 300 mm/an. Ces pluies sont liées à une humidité relativement faible en été et assez élevée en hiver, et à des températures fortement continentales à grande amplitude.

L'Atlas saharien, en raison de l'effet orographique et l'exposition du versant Nord, enregistre une remontée du total pluviométrique vers des valeurs de 400 à 600 mm par an ; les sommets de l'Aurès pouvant recevoir plus de 600 mm. L'isohyète 300 mm marque l'amorce de la décroissance des précipitations sur le piémont Sud de l'Atlas dont la bordure méridionale est jalonnée par l'isohyète 200 mm et même 150 mm. (Mebarki, 2005). Cette zone est généralement sous l'influence des masses d'air tropical continental ou l'anticyclone saharien.

Par conséquent, la variabilité des précipitations au Nord-Est algérien est régie par deux types de facteurs, à savoir les facteurs régionaux (les circulations atmosphériques et les masses d'air) et les facteurs locaux (la mer Méditerranée, les deux Atlas, et le Sahara).

La géographie des pluies obéit à de multiples contraintes et ce à diverses échelles emboîtées. À partir de la circulation atmosphérique globale (échelle zonale), la répartition des précipitations est influencée par la forme des continents, par la disposition des principales chaînes de montagne, par l'orientation de ces éléments (côtes, reliefs) vis-à-vis des flux dominants et par la continentalité, entre autres. À une échelle plus régionale, le profil des montagnes, l'importance de l'orientation et la profondeur des vallées, l'existence

ou non de cols bas sont certains des éléments qui conditionnent la plus ou moins forte pluviosité. À l'échelle locale, l'exposition, la densité de la végétation, la rugosité d'ensemble du relief peuvent également être des éléments modifiant la pluviométrie (Descroix *et al.*, 2001).

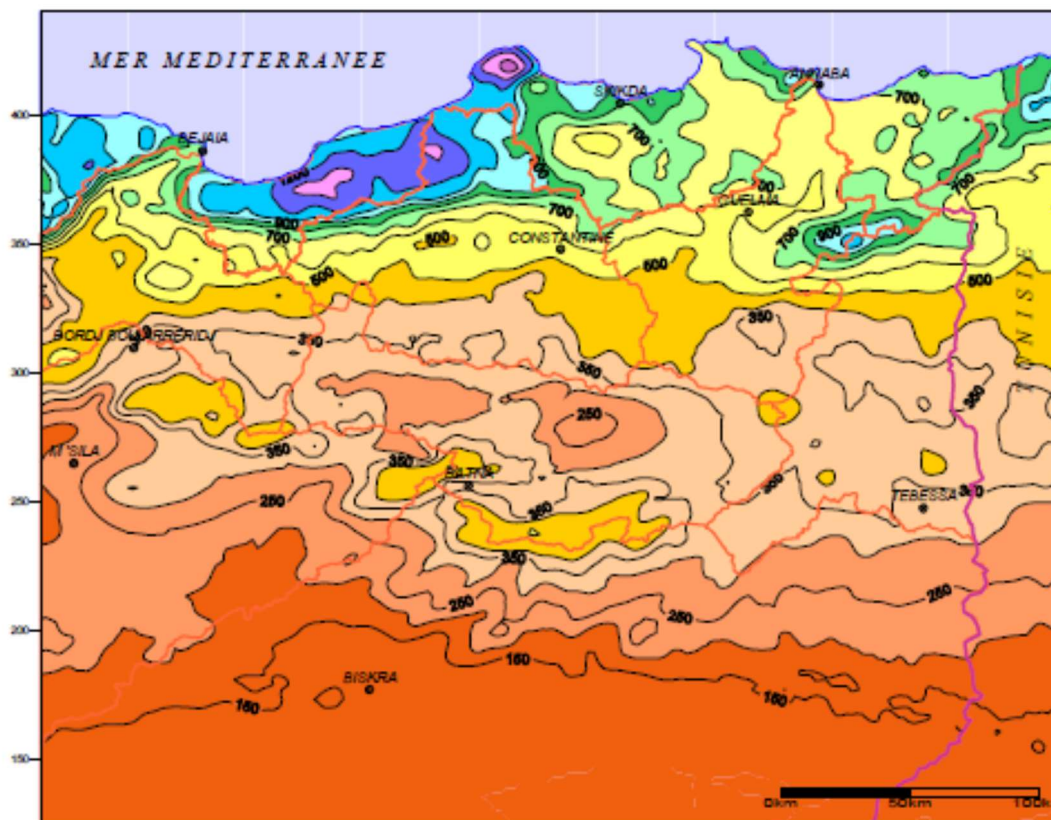


Figure 5: Carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est Algérien. (Établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989) ; in Mebarki, 2005

A l'échelle mensuelle, le Nord-Est algérien est caractérisé par une répartition des précipitations irrégulière. Les régions affectées du même régime présentent une disposition en zones parallèles à la côte. Outre la concentration des pluies sur un nombre réduit de jours par an, le régime est caractérisé par un minimum d'été (juillet-août) accentué partout alors que le maximum moyen mensuel, déjà variable en quantité, ne se situe pas au même mois partout. La zone littorale et sublittorale se caractérise par un régime monomodal (le mois le plus arrosé est placé au cœur de l'hiver, décembre ou janvier). Elle lui succède une zone de transition (un maximum principal en hiver et un maximum secondaire au printemps). Enfin, la zone intérieure (les hautes plaines en particulier) se singularise par un régime bimodal (un premier maximum en automne-hiver et un second maximum au printemps) (Mebarki, 2005).

Chapitre III : Données pluviométriques: critiques et homogénéité

III.1. Choix des stations et critiques des données

Dans le contexte d'une analyse intégrale de la variabilité spatio-temporelle des précipitations, il est nécessaire d'avoir un aperçu général et précis sur le réseau pluviométrique dans le Nord-Est algérien et s'appuyer sur les bases de données de précipitations fiables, représentatives, et de bonnes qualités, car elles influencent obligatoirement la pertinence des résultats obtenus.

III.1.1. Aperçu sur le réseau pluviométrique au Nord-Est algérien

En Algérie, les difficultés de disposer de données pluviométriques de qualité avec une profondeur temporelle suffisante, constituent la principale limite des études. Après l'indépendance, les données pluviométriques ne sont pas disponibles à des échelles spatio-temporelles fines. En effet, seuls 69 stations de mesure sont implantées sur le territoire national. De plus, ces données ne sont mesurées pas à l'échelle de la journée, ce qui est insuffisant pour l'étude à une échelle appropriée (Lazri *et al.*, 2007).

Les chroniques pluviométriques sont généralement issues de deux organismes publics ; l'Office National de la Météorologie (O.N.M) et l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H), au pas de temps journalier et mensuel. Généralement, la quantité d'information fournie par les postes pluviométriques varie d'un poste à un autre. Les séries de données présentent des tailles différentes avec bien sûr l'existence des lacunes à l'intérieur. A cet effet, nous avons rencontré des difficultés de choisir la source des données à étudier entre celle de l'ONM ou celle de l'ANRH ou bien choisir les deux sources. Nous avons opté pour le premier, vu sa disponibilité, sa fiabilité, la longueur des séries, et pour l'homogénéité de ses séries.

En Algérie, les séries d'analyses des précipitations ont été menées sur l'ensemble ou une partie du pays comme celles de Seltzer (1913-1938), Gaussien (1913-1947), Medinger (1913-1953), Chaumont et Pequin (1913-1963) et récemment l'ANRH (1993), Anser (1931-1995), et Mebarki (2005). Les connaissances sur les précipitations du Nord-Est algérien sont partielles et très dispersées. On sait qu'il s'agit d'un régime méditerranéen avec une décroissance rapide des pluies du nord vers le sud, à climat subhumide à semi-aride puis aride.

Pour le Nord-Est algérien, le volume d'informations pluviométriques recueillies est constitué d'une quarantaine de stations pluviométriques réparties de façon plus au moins uniforme. Malheureusement on n'a pas pu retenir que vingt deux (22) postes pluviométriques qui ont fonctionné sans arrêt depuis le début des années 1970.

III.1.2. Choix des stations pluviométriques et la période d'étude

Une collecte de données pluviométriques journalières et mensuelles a été effectuée auprès de l'office national de la Météorologie de Constantine (O.N.M), certaines stations climatologiques et du centre climatologique national (C.C.N) se trouvant à Alger. Les données ont été collectées sur des documents divers; bulletins météorologiques annuels (B.M.A), bulletins climatologiques mensuels (B.C.M). Les séries très courtes ont été rejetées, comme le cas des stations de Khenchela, Mila, et El Taref, ce qui nous a amenés à focaliser notre étude sur les séries de données recueillies au niveau de 22 stations pluviométriques, qui couvrent une période commune allant de 1978 jusqu'à 2010, qui sont de tailles assez longues, et représentatives du régime pluviométrique du Nord-Est algérien. Les altitudes des stations s'échelonnent de 1,3 à 1640 m et 3 stations sont localisées à plus de 1000m (tableau 1).

Spatialement, ces stations pluviométriques sont les plus représentatives des grandes unités physiques du Nord-Est algérien. Elles sont inégalement réparties ; le littoral et les hauts plateaux de la zone étudiée sont assez bien représentés contrairement aux deux Atlas (Tellien et Saharien) où ne figurent pas assez de données à cause de la difficulté d'obtenir des données fiables sur une longue période en particulier pour les postes d'altitude (figure 6).

Les critères qui ont été adoptés pour avoir un moyen fiable de comparaison et dans le but d'intégrer un ensemble de stations qui offrent des données de bonne qualité sont :

- Nombre d'années d'observations pluviométriques (supérieur à 30 ans) ;
- Taux de lacunes faible ;
- Homogénéité des séries à étudier ;
- Stations issues de réseaux professionnels (O.N.M) ;
- Représentativité des stations pour la région du Nord-Est algérien;
- La qualité et le nombre de paramètres que peuvent fournir.

Nous n'avons pas utilisé les données collectées par l'A.N.R.H. Acte volontaire dû principalement à l'inadéquation entre les données des deux établissements mais aussi pour garder et préserver l'homogénéité du travail.

En dépit de ces choix, nous avons rencontré des difficultés pour les 22 stations choisies, pour la période 1978-2010, dont les principales sont:

1- Des lacunes d'ordre mensuelles, annuelles et même journalières sont à signaler pour la période 1978-2010. Elles sont causées par :

- ✓ Le transfert des pluviomètres. Cas des stations de Souk-Ahras (1985), et Ain Yagout (1988)
- ✓ Certains bulletins quotidiens, mensuels ou encore en résumés annuels sont parfois illisibles ce qui a nous à obliger à perdre beaucoup de temps pour les portés sur nos documents personnels ;
- ✓ La centralisation et la décentralisation des données pluviométriques ;

2- La répartition inégale des stations sur l'ensemble du territoire Nord-Est algérien ; Le littoral et les hauts plateaux de la zone étudiée sont assez bien représentés contrairement aux deux Atlas (Tellien et Saharien) où ne figurent pas assez de données à cause de la difficulté d'obtenir des données fiables sur une longue période en particulier pour les postes d'altitude.

3- Le problème des ruptures d'observations qui affectent un certain nombre de stations pluviométriques ; cas de la station de Skikda en 2004 ;

Tableau 1: Coordonnées géographiques des 22 stations météorologiques dans le Nord-Est de l'Algérie (1978 - 2010).

Stations	Code	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)
El-kalla	ELK	36° 54	08° 27	15
Annaba	ANN	36° 50	07° 49	3
Skikda	SKI	36° 54	06° 54	1.3
Jijel	JIJ	36° 48	05° 45	2
Bejaia	BEJ	36° 43	05° 04	1.76
Ben-mhidi	BMH	36° 47	07° 52	10
Guelma	GMA	36° 28	07° 28	227
Souk-Ahras	SAH	36° 17	07° 58	680
B.B.A	BBA	36° 04	04° 40	928
Sétif	SET	36° 11	05° 19	1009
Constantine	CTN	36° 17	06° 37	660
O.E.B	OEB	35° 52	07° 07	888.76
Ain mlila	AML	36° 02	06° 34	771
Ain yagout	AYG	35° 47	06° 25	912
Borj el ghedir	BGD	35° 58	04° 59	954
Batna	BAT	35° 43	06° 21	827
Tébessa	TEB	35° 25	08° 07	820.47
Ain tinn	ATN	35° 20	06° 06	1640
Ras el ma	RMA	35° 26	05° 58	912
Babar	BAB	35° 09	07° 06	1450
Biskra	BIS	34° 48	05° 44	86
Meskiana	MES	35° 37	07° 39	845

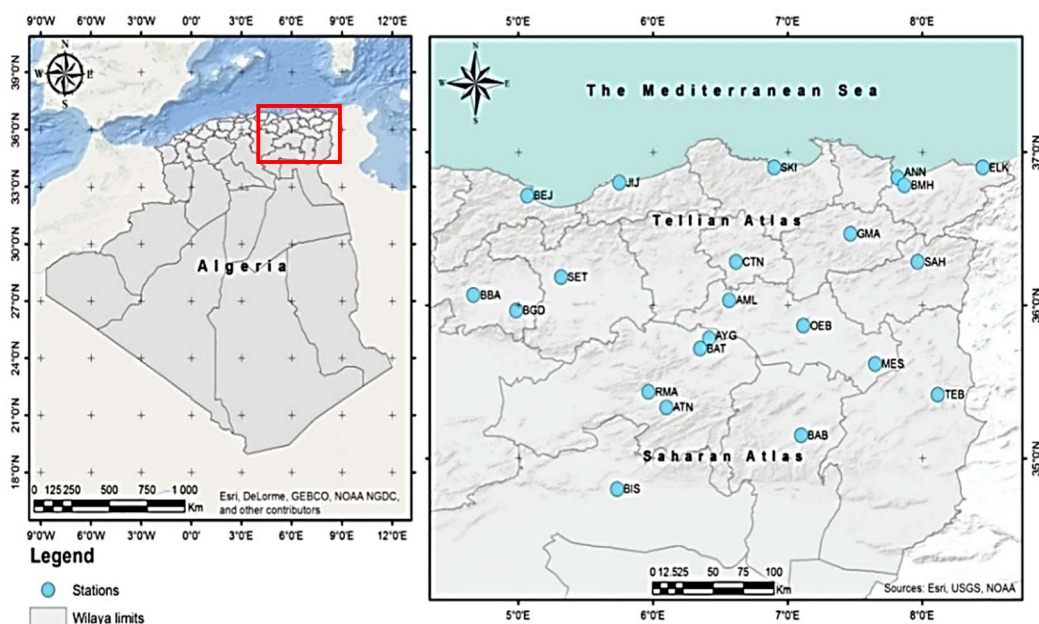


Figure 6: Répartition spatiale des stations météorologiques sélectionnées dans le Nord-Est de l'Algérie.

III.2. Vérification et contrôle des données pluviométriques

Un problème au quel on est confronté lors de l'analyse des séries en vue de détecter d'éventuels changements est la qualité insuffisante des données hydrologiques : données manquantes, manque d'homogénéité (Robson *et al.*, 1998). Cependant, il est nécessaire de s'assurer au préalable de la qualité des données des stations retenues et d'éviter l'utilisation des séries non homogènes, pour une étude fiable.

III.2.1. Estimation des données manquantes

Les données manquantes que l'on rencontre le plus souvent constituent un des principaux problèmes. D'une manière générale, les manques affectent surtout la période de la décennie 1990-2000. Les figures (7) et (8) montrent le pourcentage en valeurs annuelles manquantes totales et celles mensuelles qui est de l'ordre de 5% et aux alentours de 7,4 %, respectivement.

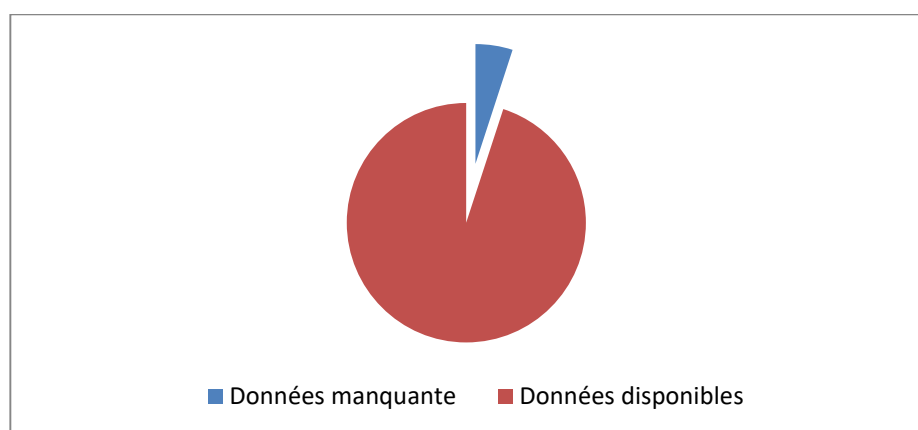


Figure 7: Pourcentage des données manquantes des précipitations annuelles (1978-2010).

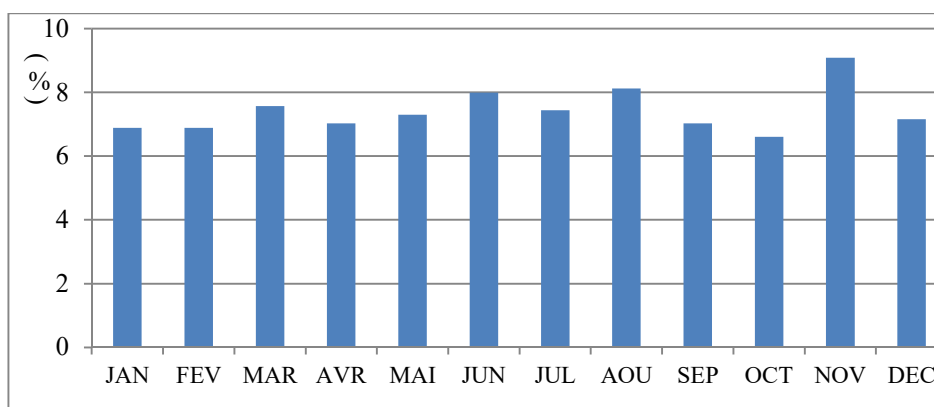


Figure 8: Pourcentage des données manquantes des précipitations mensuelles (1978-2010)

On peut estimer les données manquantes à une station pluviométrique à partir des valeurs provenant des stations voisines soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone géographique. Cependant, pour chaque station individuelle qui présente des données manquantes (station lacunaire), une station de référence a été choisie parmi les stations les mieux corrélées avec la station lacunaire (coefficient de corrélation supérieur à 0,5 ; généralement les stations appartenant aux mêmes conditions climatiques et géographiques). Nous avons sélectionné les coefficients de corrélation supérieurs à 0,5 pour mettre en valeur plusieurs stations pluviométriques lors de l'établissement des séries de référence pour compléter les valeurs manquantes dans les données pluviométriques. Dans la plupart des cas, les degrés de corrélation s'élève à 0,9 à l'échelle mensuelle et à 0,8 à l'échelle annuelle. Mais le seuil inférieur est nécessaire afin d'estimer les données manquantes pour les cas les plus difficiles, principalement les stations du Sud (méridionales).

Une moyenne a été calculée pour la série de référence ($P\hat{R}$) et la station lacunaire ($P\hat{Y}$) de la somme des précipitations observées pendant une même période commune aux deux stations (pour une période commune) et les estimations des valeurs manquantes (Pxi) sont calculées en multipliant la valeur correspondante observée, pendant le mois considéré dans la station de référence, par le rapport entre la moyenne des pluies mensuelles tombées au cours de ce mois de la série lacunaire et la série de référence (Alexandersson, 1986; Stepanek, 2006 ; Aravena et Luckman, 2009).

$$Pxi = PRi(P\hat{Y}/P\hat{R})$$

Ou

Pxi : est la valeur pluviométrique mensuelle inconnue à la station lacunaire ;

PRi : est la valeur correspondante observée pendant le même mois à la station de référence ;

$P\hat{Y}$ et $P\hat{R}$ sont les moyennes pour le mois considéré dans la série lacunaire et la série de référence respectivement.

Le comblement des lacunes mensuelles dans les stations d'Ain Tinn (Arris) et de Ras El Ma a été effectué par la méthode des gradients. Cette dernière reposant sur le calcul du gradient pluviométrique altitudinal.

III.2.2. Examen de l'homogénéité des séries

L'homogénéité des enregistrements climatiques est une exigence essentielle pour les ensembles de données utilisés pour étudier la variabilité climatique régionale. Une série climatologique est considérée comme homogène si aucun élément perturbateur ne l'a affectée, c'est-à-dire si la loi de distribution de l'élément mesuré (considéré comme une variable aléatoire) n'a pas changé pendant toute la période étudiée. (Lemarque et Jourdain, 1994). Pour Conrad et Pollak (1962), la série chronologique d'une variable climatique est considérée comme homogène si les variations sont uniquement dues à des variations de la météo et du climat. Le remplacement d'un capteur, le déplacement d'une station de quelques centaines de mètres ou une modification brutale de son environnement peuvent artificiellement modifier les mesures thématiques et rendre la série suspecte ou non homogène. Or, l'amplitude de ces biais est souvent du même ordre de grandeur que les variations climatiques que l'on cherche à mettre en évidence. La détection et la correction de ces ruptures d'homogénéité dans les séries de données climatiques sont donc des préliminaires inévitables à toute étude sur l'évolution des conditions climatiques locales. (Moisselin *et al.*, 2002 ; Aguilar *et al.*, 2003). Inhomogénéités dans les propriétés statistiques des variables climatologiques telles que les moyennes à long terme, tendances, ou les écarts types peuvent être détecté à l'aide de tests d'homogénéité. Les mesures des précipitations sont particulièrement sensibles aux inhomogénéités.

Dans cette étude, l'homogénéité des relevés pluviométriques annuels a été analysée par trois méthodes, à savoir la méthode graphique dite des doubles cumuls, l'application du test d'homogénéité de Pettitt, et le rapport Von Neumann, à un intervalle de confiance 95 %.

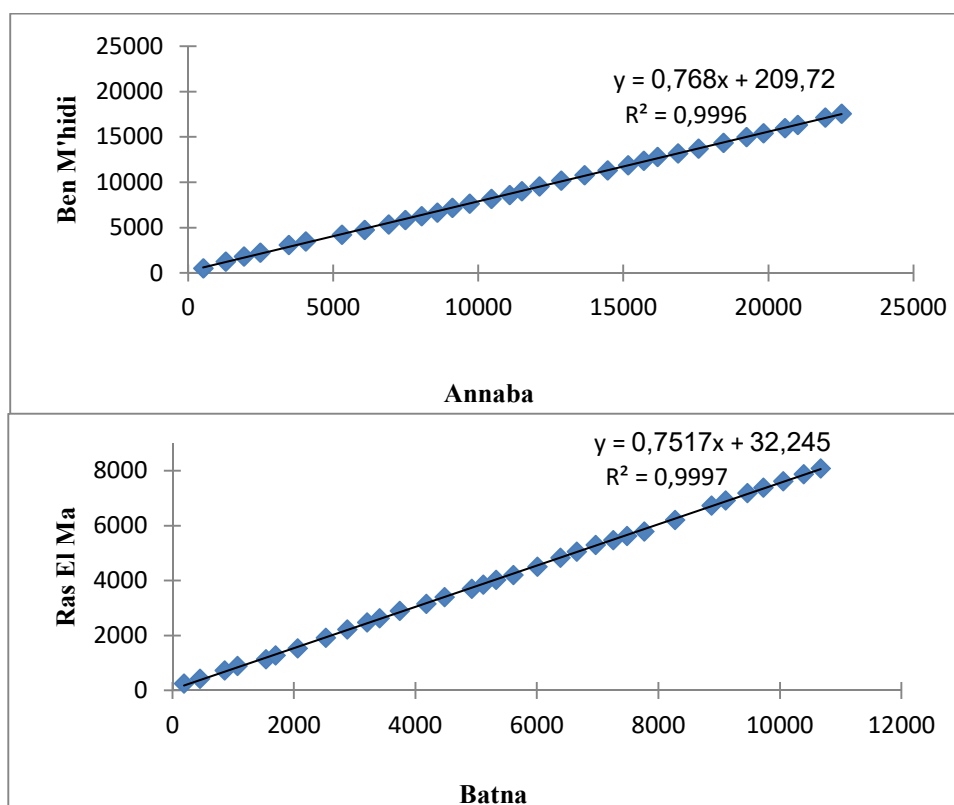
III.2.2.1. Méthode des doubles cumuls

Dans le but spécifique de comparer un ou plusieurs échantillons, acquis à des stations voisines, et pour vérifier l'homogénéité temporelle des séries de pluies annuelles, nous avons utilisé dans notre travail la méthode dite des doubles cumuls. L'analyse de cette méthode, qui est de nature subjective, consiste à faire une régression linéaire simple sur les valeurs cumulées de la série de base (y) en fonction des valeurs accumulées d'une série de référence (x). Ensuite, on produit un graphique des couples de points (x, y) sur lesquels on superpose la droite de régression. Si les séries sont homogènes, les points sont disposés aléatoirement autour de la droite de régression.

Par contre, un changement à l'une ou l'autre des deux stations se remarque par une cassure de la pente (Beaulieu *et al.*, 2007).

Ainsi, vu la grandeur de notre zone d'étude (Nord-Est algérien), on a jugé bon de choisir plusieurs stations de références, supposées homogènes ; il s'agit de Annaba et de Bejaia au littoral, Guelma et Constantine dans les bassins intérieurs et l'Atlas tellien, Tébessa et Sétif dans les hauts plateaux et Batna dans l'Atlas saharien.

Cependant, après contrôle de toutes les séries pluviométriques, nous avons constaté que toutes les stations testées montrent une homogénéité. En effet, la comparaison des moyennes annuelles des précipitations de l'ensemble des stations de références et les stations à contrôler, voisines aux précédentes, a donné des liaisons linéaires et positives, et ne présentées aucune cassure ce qui signifie que les données des stations à contrôler sont fiables. Ces résultats sont dus sûrement à la qualité professionnelle de la plupart des stations prises dans notre étude. La figure 9, montre quelques exemples de stations contrôlées par des stations de références.



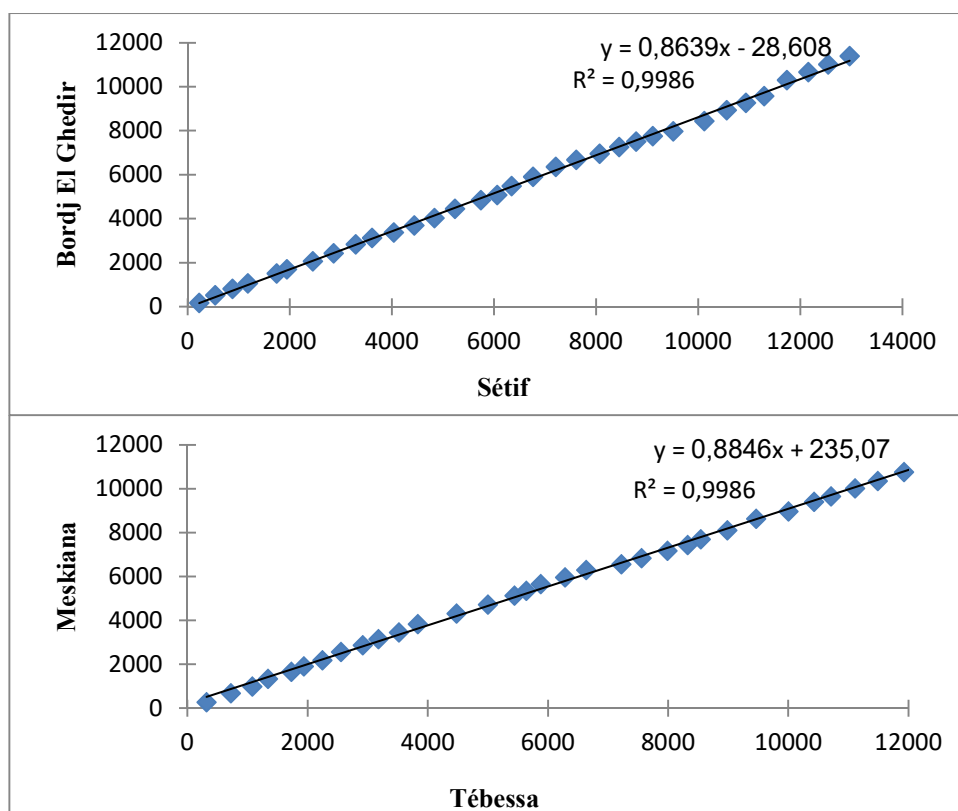


Figure 9: Contrôles des totaux annuels des précipitations par la méthode des doubles cumuls.

III.2.2.2. Test d'homogénéité : Test de Pettitt

Afin de confirmer les résultats obtenus par la méthode graphique, cette fois, nous avons vérifié l'homogénéité des séries des postes pluviométriques dans la zone d'étude, par l'approche de Pettitt, qui est un test non paramétrique pour identifier un changement de moyenne ou de variance dans une série. Ainsi, l'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (pas de rupture au sein de la série). La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (x_i) $i = 1$ à t et $t + 1$ à N appartiennent à la même population (Pettitt, 1979). La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable U_t , N est définie par:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

Avec $i = 1, N$ et avec $j = t + 1, N$

$$\text{Où } D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \begin{cases} \text{sgn}(z) = 1 \text{ si } z > 0 \\ \text{sgn}(z) = 0 \text{ si } z = 0 \\ \text{sgn}(z) = -1 \text{ si } z < 0 \end{cases}$$

Avec, $(z = x_i - x_j)$

L'absence d'une rupture dans la série (x_i) constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de la rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. L'application du test est assurée par le logiciel Xlstat, pour un niveau de signification de 5%.

III.2.2.3. Test du rapport de Von Neumann (Von Neumann Ratio Test, 1941)

Le rapport de Von Neumann (Von Neumann, 1941) est un test non paramétrique le plus largement utilisé pour détecter la non-homogénéité dans les séries temporelles. Ce test ne donne aucune information sur le point de rupture mais fournit une estimation du niveau global de non-homogénéité des données.

Cependant, Soit une série chronologique de n observations d'une variable continue Y_i , on définit le coefficient de Von Neumann (N). Pour son application, on considère la variable appelée rapport de Von Neumann (N), qui calcule un rapport des différences entre les observations consécutives dans la série sur la variance. La présence d'une inhomogénéité dans la série risque de gonfler la variance et ainsi diminuer la valeur de la statistique de Von Neumann. Il est basé sur le ratio de Von Neumann, défini par la formule:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$\text{Avec } \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

Le tableau 2 montre les résultats des tests d'homogénéité pour les précipitations annuelles des 22 stations étudiées. Sur la base de ces résultats, on constate que toutes les séries annuelles des stations sont homogènes puisque l'hypothèse nulle pour le test de Pettitt et le rapport de Von Neuman n'est pas rejetée au seuil de signification de 5 %, et confirment les résultats précédemment obtenus par la méthode graphique.

Tableau 2: Résultats du test de pettitt et de Von Neumann

Station	Test de pettitt $p (\alpha=0,05)$	Von Neumann $p (\alpha=0,05)$	Caractéristique
BBA	0,16	0,21	Homogène
CTN	0,74	0,94	Homogène
JIJ	0,10	0,84	Homogène
BEJ	0,58	0,95	Homogène
SKI	0,35	0,96	Homogène
ANN	0,76	0,54	Homogène
BAT	0,92	0,62	Homogène
OEB	0,12	0,20	Homogène
ELK	0,77	0,83	Homogène
BIS	0,46	0,74	Homogène
TEB	0,09	0,15	Homogène
ATN	0,47	0,53	Homogène
SET	0,32	0,70	Homogène
SAH	0,22	0,41	Homogène
GMA	0,13	0,86	Homogène
BGD	0,25	0,37	Homogène
AYG	0,82	0,86	Homogène
RMA	0,92	0,20	Homogène
AML	0,17	0,53	Homogène
BAB	0,85	0,19	Homogène
BMH	0,73	0,94	Homogène
MES	0,29	0,14	Homogène

Chapitre IV : Variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles au Nord-Est algérien

Le système climatique présente des relations complexes avec le cycle de l'eau. L'augmentation des températures affecte simultanément différentes composantes des systèmes hydrologiques: les précipitations (en quantité, intensité et fréquence) ; la fonte des neiges; la teneur atmosphérique en vapeur d'eau; l'évapotranspiration; et le débit des cours d'eau. Plusieurs auteurs s'accordent à dire que les aspects liés à l'eau occuperont une place prépondérante parmi les impacts potentiels des changements climatiques (Gleick, 1986; Hulme, 1996 b). Il ya donc un intérêt particulier des scientifiques à l'étude de la variabilité climatique et des ressources en eau.

La variabilité spatiale et temporelle des précipitations et leur distribution inégale sur la surface sont un phénomène très présent dans le Nord-Est algérien. Cette hétérogénéité spatiale de la quantité de pluie dérive de la complexité de la topographie de la région et de la circulation atmosphérique. Cette variabilité annuelle des précipitations influence essentiellement les ressources en eau, la gestion de l'agriculture régionale, les écosystèmes, l'environnement, l'économie en générale.

Dans cette optique, nous nous proposons d'analyser la variabilité spatiotemporelle des précipitations annuelles dans la région du Nord-Est algérien pendant la période 1978-2010. Pour cela, l'analyse tiens compte des 22 stations pluviométriques retenues, qui présentent des séries homogènes, continues, et représentatives de la région d'étude. Cependant, deux démarches ont été approchées dans ce travail. Une première approche, nous allons analyser l'ampleur de la variabilité absolue et relative des pluies annuelles afin de mettre en évidence les contrastes régionaux caractéristiques de l'intensité de la variabilité structurelle annuelle et étudier les aspects régionaux des précipitations annuelles, et une seconde s'intéressant d'avantage à une vérification de la variabilité des pluies annuelles dans leur succession chronologique ordinaire.

IV.1. La variabilité spatiale des pluies annuelles au Nord-Est algérien

Afin de caractériser la variabilité spatiale des pluies annuelles aux différents pas de temps et à diverses régions, plusieurs paramètres statistiques peuvent être utilisés. Dans la présente étude, les données présentées sous forme de précipitations annuelles ont été d'abord utilisées pour calculer les coefficients de variation (C_v) et la valeur maximale,

minimale et l'étendue sont présentées. Les coefficients d'Asymétrie (C_s) et les méthodes statistiques ont été appliquées plus tard pour compléter et affiner l'analyse. Voici quelques-uns des caractères fondamentaux qui présentent souvent un intérêt: paramètres de tendance centrale (la moyenne arithmétique, la médiane, le mode), paramètres de dispersion (l'écart-type, et le paramètre de dispersion relative : le coefficient de variation (C_v)), paramètre de symétrie (coefficient d'asymétrie), et paramètre d'aplatissement (le coefficient d'aplatissement). Les paramètres statistiques (moyenne, écart-type, skewness, kurtosis et coefficient de variation) des précipitations annuelles ont été calculés pour chaque station au cours de la période de 1978 à 2010.

Nous présentons pour chaque station un tableau des précipitations moyennes annuelles brutes dans lequel sont indiqués la moyenne et l'écart type sur la période d'observation, le maximum, la médiane, et le minimum de chaque série.

Pour évaluer la variabilité spatiale des précipitations annuelles de la région d'étude, nous nous basons sur ces paramètres :

a- L'écart-type (σ) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(P_i - \bar{P})^2}{N}}$$

Avec :

P_i : Cumul annuel de l'année i

\bar{P} : Moyenne des pluies annuelles

N : Nombre de l'année

L'écart-type de la série, qui caractérise la dispersion de la série autour de sa moyenne, traduit les fluctuations de la série. L'écart-type est la racine carrée de la variance. Un faible écart type signifie que les valeurs sont peu dispersées autour de la moyenne.

b- Le coefficient de variation (C_v) :

Le coefficient de variation qui est le rapport de l'écart-type à la moyenne s'exprime en %. Le degré de variabilité est souvent mesuré par le coefficient de variation (Groupe Chadule, 1994). Selon Camberlin (1994), l'utilisation de cette notion statistique nécessite beaucoup de prudence, notamment dans les régions à faible pluviosité, ce qui est le cas d'une grande partie du domaine étudiée.

En effet, le coefficient de variation s'avère satisfaisant dans la mesure de la dispersion utilisable dans l'étude comparée des stations. Les valeurs extrêmes influencent le coefficient de variation qui augmente dans le sens inverse de la moyenne, il est calculé par la formule :

$$Cv\% = \sigma / \bar{x} \times 100$$

\bar{x} : Moyenne de la série; σ : Écart-type.

c - Paramètre de symétrie (coefficient de symétrie)

L'asymétrie est la propriété qui montre la symétrie de la distribution des probabilités et elle est donnée comme suit :

$$Skew = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3$$

Ici x_i , $i = 1, 2 \dots N$ est la valeur des données, μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type.

L'asymétrie de la distribution normale est 0, car elle est symétrique. L'asymétrie à gauche (négative) montre plus de données sur la partie gauche de la distribution de probabilité, tandis que la droite (positive) l'asymétrie montre plus de données du côté droit de la distribution de probabilité.

d- Paramètre d'aplatissement (coefficient d'aplatissement)

Le coefficient d'aplatissement (Kurtosis) est un quotient sans dimension qui fournit une mesure relative permettant de comparer différents degrés d'aplatissement. L'aplatissement est donné comme suit :

$$Kurt = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}$$

Ou, x_i , $i = 1, 2 \dots N$ est la valeur des données, μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type.

Les coefficients dont le Ck est positif présentent une distribution pointue, donc leptokurtique, tandis que celles qui ont un aplatissement négatif ont une distribution arrondie autour de la moyenne (platikurtique).

IV.1.1. La variabilité absolue des pluies annuelles (Le modèle spatiale de l'écart type)

Tableau 3: Caractéristiques descriptives des séries d'observations à l'échelle annuelle.

Stations	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Minimum	Maximum
BBA	356,76	342,90	94,95	159,10	594,90
CTN	522,80	506,50	133,16	252,70	876,10
JIJ	911,42	849,36	188,64	486,30	1213,60
BEJ	762,37	767,30	189,87	319,20	1100,90
SKI	769,95	754,00	164,02	491,70	1157,40
ANN	682,46	634,60	170,09	427,70	1243,20
BAT	323,35	308,50	100,34	159,20	601,90
OEB	361,96	359,60	109,60	156,60	665,00
ELK	676,48	676,97	168,72	397,50	1049,00
BIS	126,71	126,30	54,21	47,00	295,00
TEB	372,69	364,70	103,96	199,00	643,30
ATN	459,05	434,40	133,72	221,00	779,30
SET	392,96	401,20	83,60	200,80	605,30
SAH	686,38	674,30	180,12	367,90	1017,00
GMA	598,58	579,20	151,86	362,70	938,50
BGD	345,25	331,47	105,92	180,50	727,28
AYG	308,29	284,50	102,12	90,40	520,90
RMA	244,94	250,90	84,20	131,20	531,30
AML	359,15	364,00	107,15	191,00	608,20
BAB	296,20	298,95	102,53	134,90	680,60
BMH	531,98	524,40	120,75	341,04	826,00
MES	336,50	329,83	68,29	226,41	520,07

Les statistiques descriptives concernant les précipitations annuelles pour les stations étudiées sont présentées dans le tableau 3. Cependant, les précipitations annuelles s'étendent entre 126,71 mm dans la station de Biskra au Sud et 911,42 mm au Nord (jijel). La moyenne annuelle pour la région d'étude est de 473,92 mm. Dans la région d'étude, les valeurs de l'écart type révèlent une grande dispersion absolue des précipitations annuelles. Elles varient entre 54,21 mm et 189,87 mm pour la région sud (Biskra) et le littoral (Bejaia), respectivement. Les variations des précipitations présentent des profils similaires à la moyenne pour la plupart des régions, c'est-à-dire que les régions ou les moyennes des précipitations sont les plus élevées présentent une plus grande variabilité interannuelle et vis versa.

En analysant l'écart type dans les différentes régions du Nord-Est algérien, on constate que l'ampleur et l'intensité de la variabilité absolue des pluies ne sont pas homogènes. Cependant, les fortes variabilités absolues sont enregistrées dans les stations côtières et la station de SAH ou les écarts types dépassent 160 mm. Dans les stations des bassins

intérieurs, des hauts plateaux et celles de l'atlas Tellien et l'atlas Saharien, les écarts types sont compris entre 70 et 150 mm. Le sud de l'Atlas saharien présente un écart type faible qui est de l'ordre de 54,21 mm (station de Biskra). De ce fait, la variabilité absolue:

- Diminue du Nord vers le Sud dans la région d'étude à cause de la décroissance des pluies ; en franchissant la barrière montagneuse (Atlas tellien), les vents perdent une grande partie de leur humidité, l'air se comprime dans son mouvement de descente et se réchauffe, donc il se dessèche (effet de foehn) : on enregistre 133,16 mm à Constantine, alors qu'à cent kilomètre à l'Ouest, Sétif située à plus de 1000m d'altitude, est déjà dans le domaine semi-aride, (83,60 mm). L'effet d'abris est particulièrement accentué à l'ouest de la zone d'étude, malgré l'altitude.
- Une nette diminution de la variabilité absolue est aussi à signaler à mesure que l'on va vers le sud, ici la topographie s'abaisse et le rôle de la continentalité, se fait d'avantage sentir ; où l'écart type n'atteint que 54,21 au piedmont de l'atlas Saharien (Biskra).

Ces amplitudes pluviométriques ont des conséquences sur les activités humaines et économiques.

IV.1.2. La variabilité relative des pluies annuelles

Tableau 4: Variabilité des précipitations annuelles dans les stations étudiées (1978-2010).

Stations	Cv	Stations	Cv
BBA	0,266	ATN	0,291
CTN	0,254	SET	0,212
JIJ	0,207	SAH	0,262
BEJ	0,249	GMA	0,253
SKI	0,213	BGD	0,306
ANN	0,249	AYG	0,331
BAT	0,310	RMA	0,343
OEB	0,302	AML	0,298
ELK	0,249	BAB	0,346
BIS	0,427	BMH	0,227
TEB	0,278	MES	0,203

Pour caractériser la variabilité annuelle spatiale, nous avons calculé le coefficient de variabilité qui nous donne une idée globale sur ce phénomène (tableau 4). La valeur moyenne du coefficient de variation pour la zone d'étude est de 27%. Pour toutes les stations étudiées, il apparait que la variabilité interannuelle est très prononcée ; aucune station n'a un coefficient de variation inférieur à 20%. La station de Biskra a atteint 42,7%.

Spatialement, l'espace coincé entre la mer méditerranée au nord et la limite méridionale de l'atlas Tellien est caractérisée par les stations qui ont des coefficients de variation inférieurs à 27% ; c'est le cas notamment de Jijel (20,7%), Ben M'hidi (22,7%), Guelma (25,3%) et Constantine (25,4%). Sur les hauts plateaux et dans la partie septentrionale de l'atlas Saharien, le coefficient de variation oscillent entre 27 et 35 % ; comme le cas des stations de Tébessa (27,8%), O.E.B (30,2 %), Batna (31 %), Babar (34,6%). Le sud s'individualise par les valeurs supérieures à 35 %. Cas de la station de Biskra (42,7 %) (figure 10).

Nous remarquons que les valeurs de la variabilité interannuelle augmentent du nord au sud d'une manière très claire, et d'est en ouest d'une manière moins claire. Ce constat est semblable à celui trouvé par Anser (1998).

On constate aussi qu'aux quantités pluviométriques relativement élevées correspondent des coefficients de variabilité relativement faibles ; inversement, les coefficients de variation relativement forts correspondent aux quantités pluviométriques relativement faibles. Les hauts plateaux constituent un domaine transitoire tant sur le plan des quantités pluviométriques moyennes annuelles que sur la variabilité annuelle.

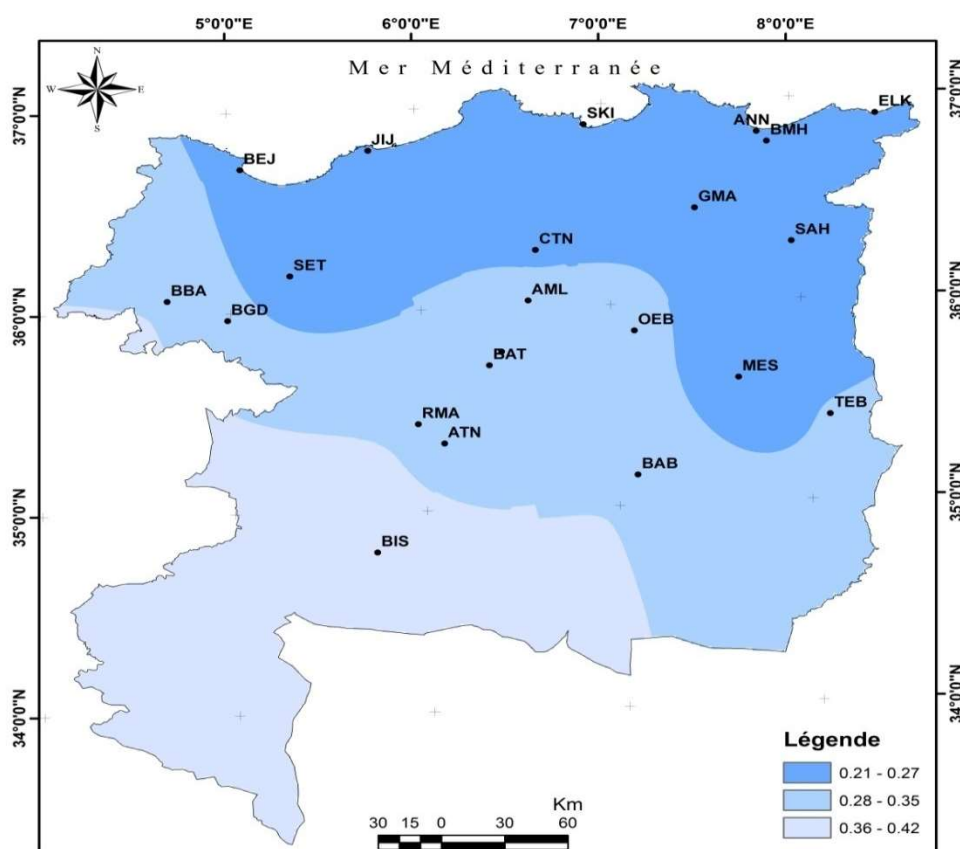


Figure 10 : Distribution spatiale du coefficient de variation des pluies annuelles en Algérie orientale (1978-2010) ; source : propre élaboration

Au Nord-Est algérien, la variabilité des précipitations est contrôlée par plusieurs facteurs.

Le gradient nord/sud, depuis les zones humides côtières jusqu'aux zones aride du piedmont de l'Atlas saharien, c'est-à-dire, l'effet de la latitude mis en évidence par le coefficient de corrélation, malgré qu'il est moyen, montre qu'il y'a une augmentation progressive des valeurs du C_v (Jijel 20,7%, Constantine 25,4%, O.E.B 30,2%, Ain Yagout 33,1 % Biskra 42,7%) (tableau 4). La relation entre le C_v et la latitude explique 61,7 % de la variabilité des pluies annuelles (figure 11).

Cette variabilité peut être aussi s'expliquée par la présence d'un gradient longitudinale ; en effet, on constate qu'il y'a une décroissance longitudinale observée dans un espace restreint des grandes unités physiques d'Est en Ouest à savoir les plaines littorales ; Skikda (21,3 %), Bejaia (24,9 %), les hauts plateaux ; Tébessa (27,8%), O.E.B (30,2%), Batna (31%).

L'effet de la continentalité, en effet la variabilité interannuelle des précipitations s'abaisse d'une manière sensible au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la mer Méditerranée, ou le C_v atteint des valeurs supérieures à 40% dans les stations du sud, cas de la station de Biskra.

L'altitude, étant en principe un facteur d'amplification par forçage orographique combinée avec l'exposition des versants montre une irrégularité des valeurs du C_v entre les versants orientés Nord et les versants orientés Sud. En conséquence, la variabilité pluviométrique augmente avec l'altitude dans les versants orientés nord dans l'Atlas tellien ; BenM'hidi (22,7%), Guelma (25,3%) et SoukAhras (26,2%), inversement, le C_v diminue avec l'altitude dans le versant sud de l'Atlas Saharien, Biskra (42,7%), Ras-Elma (34,3%), Ain Tinn (29,1%). Pour Ronchail et Gallaire (2006), ce n'est pas tant l'altitude absolue qui compte que la présence de pentes susceptibles d'aider au déclenchement de la convection, lorsqu'existe une source d'humidité suffisante dans les environs.

Par conséquence, on peut conclure que la variabilité spatiale des pluies annuelles au Nord-Est algérien peut être expliquée par plusieurs facteurs ; la latitude, la continentalité, l'altitude combiné à l'exposition et l'effet des barrières montagneuses, et avec un degré moindre à la longitude.

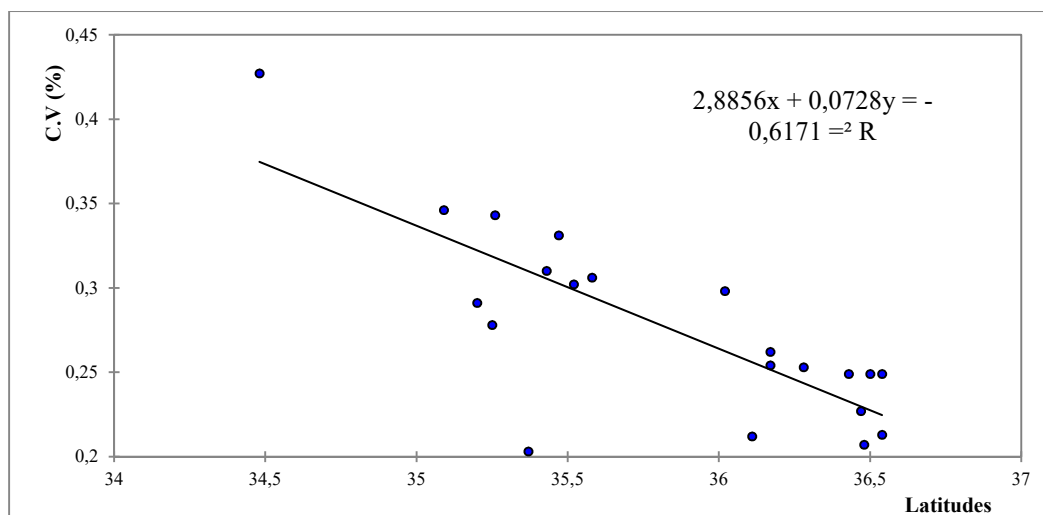


Figure 11: Relation entre la latitude et le coefficient de variation (Cv)

IV.1.3. Modèles spatiaux d'asymétrie et d'aplatissement

Le coefficient d'asymétrie caractérise le degré de symétrie d'une distribution par rapport à sa moyenne. L'asymétrie aide à choisir les tests statistiques qui peuvent être appliqués lorsque les données ne sont pas normalement distribuées.

Le coefficient d'asymétrie a été calculé pour toutes les stations étudiées, qui varié entre - 0,15 et 1,34, enregistré dans les stations de Bejaia et de Babar, respectivement. L'asymétrie étant principalement positive avec une moyenne de 0,57 indiquant que les précipitations annuelles sont asymétriques dans le Nord-Est algérien.

Cependant, Pour la quasi-totalité des stations les moyennes annuelles des précipitations présentent une distribution unilatérale décalée vers la droite, ce qui indique une fréquence moins élevée de faibles précipitations annuelles (Skewness < 2), à l'exception des stations de Jijel (-0,10) et de Bejaia (- 0,15) (décalé vers la gauche), ce qui indique une fréquence moins élevée de petite gamme de fortes précipitations annuelles (Skewness > -2). Tout cela signifie qu'il y'a une faible concentration autour de la moyenne. Toutefois, les distributions annuelles des précipitations sur chaque poste de la région d'étude sont peu asymétriques, car toutes les stations présentaient des coefficients d'asymétrie généralement comprises entre -2 et 2 (tableau 5). Des valeurs d'inclinaison de l'ordre de -2 à 2 sont généralement acceptables (Niel *et al.*, 2005 ; Gravetter et Wallnau, 2011). Au pas de temps annuel, la distribution des séries de précipitations totales peut être considérée normale (Von Storch et Zwiers, 2001).

Le coefficient d'aplatissement ou kurtosis varie de $-0,95$ à $4,84$. La valeur moyenne du coefficient de kurtosis est de $0,72$ pour le Nord-Est algérien. Les coefficients dont le Ck est positif (stations des hauts plateaux et de l'Atlas saharien surtout) présentent une distribution pointue, donc leptokurtique, tandis que celles qui ont un aplatissement négatif, enregistré surtout pour les stations littorales, ont une distribution arrondie autour de la moyenne (platikurtique). Ces stations montrent qu'elles ont une distribution différente de celle d'une distribution normale. Pour Gravetter et Wallnau (2011), une valeur d'aplatissement comprise entre -2 et $+2$ est généralement acceptable pour prouver une distribution univariée normale. Donc la plupart des données sur les précipitations ne présentent pas d'aplatissement significatif (tableau 5).

Tableau 5: Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement pour les stations étudiées

Stations	Skewness	Kurtosis
BBA	0,47	0,73
CTN	0,58	0,52
JIJ	-0,10	-0,95
BEJ	-0,15	-0,004
SKI	0,45	-0,10
ANN	1,05	2,07
BAT	0,65	0,33
OEB	0,45	0,59
ELK	0,27	-0,48
BIS	0,85	1,00
TEB	0,52	0,33
ATN	0,76	0,55
SET	0,12	0,81
SAH	0,05	-0,74
GMA	0,55	-0,39
BGD	1,21	3,68
AYG	0,40	0,05
RMA	1,30	2,82
AML	0,26	-0,38
BAB	1,34	4,84
BMH	0,79	0,19
MES	0,74	0,39

Ces résultats montrent que certaines stations reçoivent davantage de précipitations en raison d'événements de faible fréquence et d'intensité élevée, tandis que d'autres stations reçoivent leurs pluies par des événements plus fréquents et moins intenses. Cependant,

cette analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement de la distribution des précipitations peut expliquer les variations entre le nombre de jours de pluie par an et les précipitations annuelles dans le chapitre suivant (Merniz, *et al.*, 2019)

IV.2. Variabilité temporelle des pluies annuelles au Nord-Est algérien

L'analyse d'une série temporelle a pour but d'améliorer la compréhension des mécanismes statistiques générateurs de cette série d'observations (Kendall et Stuart, 1943). Cet objectif ne peut être atteint en considérant qu'une seule série de données. Dans cette étude, nous essayons d'analyser le comportement de la pluviométrie annuelle au fil du temps pour la période 1978-2010 dans le Nord-Est algérien.

Le traitement statistique des séries pluviométriques a porté essentiellement sur l'analyse d'éventuelles modifications statistiques au sein des séries chronologiques. Pour représenter l'évolution naturelle des précipitations annuelles, nous avons utilisé des modèles mathématiques : la tendance et la rupture, qui sont bien adaptées pour décrire des phénomènes progressifs pour les régimes hydrométriques. D'une façon générale, une série chronologique peut se décomposer en 4 éléments (Lubès *et al.*, 1994) :

- un élément purement aléatoire, exempt par conséquent de toute régularité et tout caractère systématique ;
- un élément tendanciel ou « tendance » traduisant un comportement préférentiel de la variable ;
- un élément oscillatoire ou cyclique qui traduit un comportement plus ou moins périodique ou présentant des répartitions plus ou moins régulièrement espacées ;
- une auto corrélation ou un effet de mémoire: la grandeur d'une observation est dépendante de la magnitude des observations précédentes.

Pour chaque variable météorologique et pour chaque indice climatique, la tendance annuelle est identifiée en utilisant la méthode de la régression linéaire (Brunetti *et al.*, 2000) et pour évaluer la significativité statistique le critère de Mann Kendall est appliqué (Sneyers, 1990).

Dans notre étude, nous avons adopté la démarche de l'analyse chronologique des pluies, adopté par la plupart des climatologues, qui comprend quatre étapes différentes :

- a - Vérification du caractère aléatoire ou non de la série ;
- b - Identification de la tendance en utilisant la méthode de la régression linéaire, évaluation de la significativité statistique par le critère de Mann Kendall, et enfin l'estimateur de la

penne de Sen est utilisée pour quantifier la penne de la tendance, pour de l'évolution des précipitations annuelles au Nord-Est algérien ;

c - Mettre en évidence les phases humides et les phases sèches en repérant les éventuels mouvements oscillatoires internes des séries pluviométriques ;

d - Détecter les points de rupture au sein des séries pluviométriques et quantifier la diminution pluviométrique de part et d'autre de la date de rupture.

Cependant, pour analyser la variabilité temporelle des précipitations annuelles pour la période 1978-2010, dans le Nord-Est algérien, nous avons utilisé 22 stations pluviométriques. La lecture de données mentionnées dans le tableau 3, montre qu'aucune station n'a une moyenne pluviométrique supérieure à 950 mm. Aucune station n'a une moyenne annuelle inférieure à 120 mm. Concernant les maxima pluviométriques de ces 22 stations, aucune station n'a un maxima supérieur à 1250 mm. Le maximum absolu est de 1243,20 mm (Annaba). Le minima est enregistré à la station de Biskra (47 mm).

IV.2.1. Analyse du caractère aléatoire des séries pluviométriques

Le caractère aléatoire simple d'une série d'observations est défini par le fait que toutes les observations de la série sont issues de la même population et qu'elles sont toutes indépendantes entre elles. Du point de vue de la statistique mathématique, cela signifie une stabilité de la loi de répartition et absence de lien entre les éléments consécutifs. (Renard, 2006)

L'analyse des séries chronologiques nous sert à comprendre comment les données varient en fonction du temps, suivant l'échelle qu'on s'est donnée. Les tests les plus répandus portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observation. Ces tests sont en général assez puissants pour permettre une distinction entre le caractère aléatoire et le caractère non aléatoire de la série pluviométrique. Pour mesurer ce caractère selon lequel chaque valeur est corrélée avec celle qui la précède, plusieurs méthodes statistiques sont utilisées pour vérifier ce caractère. Pour notre analyse, nous avons utilisé le test de corrélation sur le rang (taux de Kendall) et test de l'autocorrélogramme. Ces 02 tests non paramétriques ne font pas d'hypothèse sur la nature de la distribution de probabilité de la variable définissant la série des observations.

IV.2.1.1. Test de corrélation sur le rang

C'est un test qui ne suppose aucune propriété particulière de la série chronologique à étudier et qui analyse le caractère aléatoire de la série.

Kendall et Stuart (1943), proposent que l'hypothèse nulle à vérifier soit : « la série des (x_i) , $i=1, N$, est aléatoire » où x_i désigne les réalisations de la variable X observées à des pas de temps successifs égaux.

On calcule le nombre de paires P pour lesquelles $x_j > x_i$, $j > i$, avec $i = 1, \dots, N-1$. Pour N grand ($N > 30$), sous l'hypothèse nulle, la variable τ telle que :

$$\tau = 1 - \frac{4Q}{N(N-1)} - 1 \quad \text{avec} \quad Q = \frac{N(N-1)}{p} - p$$

suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à :

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2N + 5)}{9N(N - 1)}$$

Il en résulte que si l'hypothèse nulle est vraie, la variable $U = \frac{\tau}{\sigma_\tau}$ est une variable normale réduite. Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre :

$$-U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_\tau \quad \text{et} \quad U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_\tau$$

L'hypothèse alternative de ce test est celle d'une tendance. Lorsque l'on s'intéresse directement à la distribution asymptotique de la variable P , ce test porte le nom de test de Mann-Kendall.

Les résultats obtenus par l'application du test de corrélation sur le rang montrent, pour la totalité des stations retenues, que l'hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) est acceptée au seuil de confiance de 95%. On peut donc déduire, que les séries pluviométriques annuelles retenues pour cette étude, présentent un caractère purement aléatoire (tableau 6).

Tableau 6: Résultats du test de corrélation sur le rang appliqué aux séries pluviométriques annuelles à un seuil de 95%.

Stations	U	H ₀
BBA	1,89	Acceptée (aléatoire)
CTN	-0,805	Acceptée (aléatoire)
JIJ	1,208	Acceptée (aléatoire)
BEJ	0,37	Acceptée (aléatoire)
SKI	0,433	Acceptée (aléatoire)
ANN	0,093	Acceptée (aléatoire)
BAT	0,278	Acceptée (aléatoire)
O.E.B	1,89	Acceptée (aléatoire)
ELK	-0,278	Acceptée (aléatoire)
BIS	0,65	Acceptée (aléatoire)
TEB	1,487	Acceptée (aléatoire)
ATN	-0,12	Acceptée (aléatoire)
SET	1,208	Acceptée (aléatoire)
SAH	1,02	Acceptée (aléatoire)
GMA	1,76	Acceptée (aléatoire)
BGD	1,42	Acceptée (aléatoire)
AYG	0,402	Acceptée (aléatoire)
RMA	0,340	Acceptée (aléatoire)
AML	1,394	Acceptée (aléatoire)
BAB	0,216	Acceptée (aléatoire)
BMH	-0,464	Acceptée (aléatoire)
MES	0,74	Acceptée (aléatoire)

IV.2.1.2. Application de l'autocorrélogramme

L'application du test de l'autocorrélogramme permet de déceler la présence ou l'absence d'une organisation dans les séries chronologiques des données climatiques (Kendall et Stewart, 1943). Le caractère aléatoire d'une série chronologique est donné par le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1, plus connue sur le terme autocorrélogramme. Cependant, l'existence des dépendances significatives entre les termes successifs d'une série non aléatoire, le coefficient d'autocorrélation d'ordre k sera significativement différent de 0. Ce coefficient se calcule par la formule suivante :

$$R_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X}_1)(X_{t+k} - \bar{X}_2)}{\sqrt{(\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X}_1)^2 \sum_{t=1}^{n-k} (X_{t+k} - \bar{X}_2)^2)}}$$

avec :

\bar{X}_1 Moyenne des observations (X_i) , $i = 1, n-k$

\bar{X}_2 Moyenne des observations (X_i) , $i = k+1, n$

n est le nombre d'observation et k est le décalage temporel.

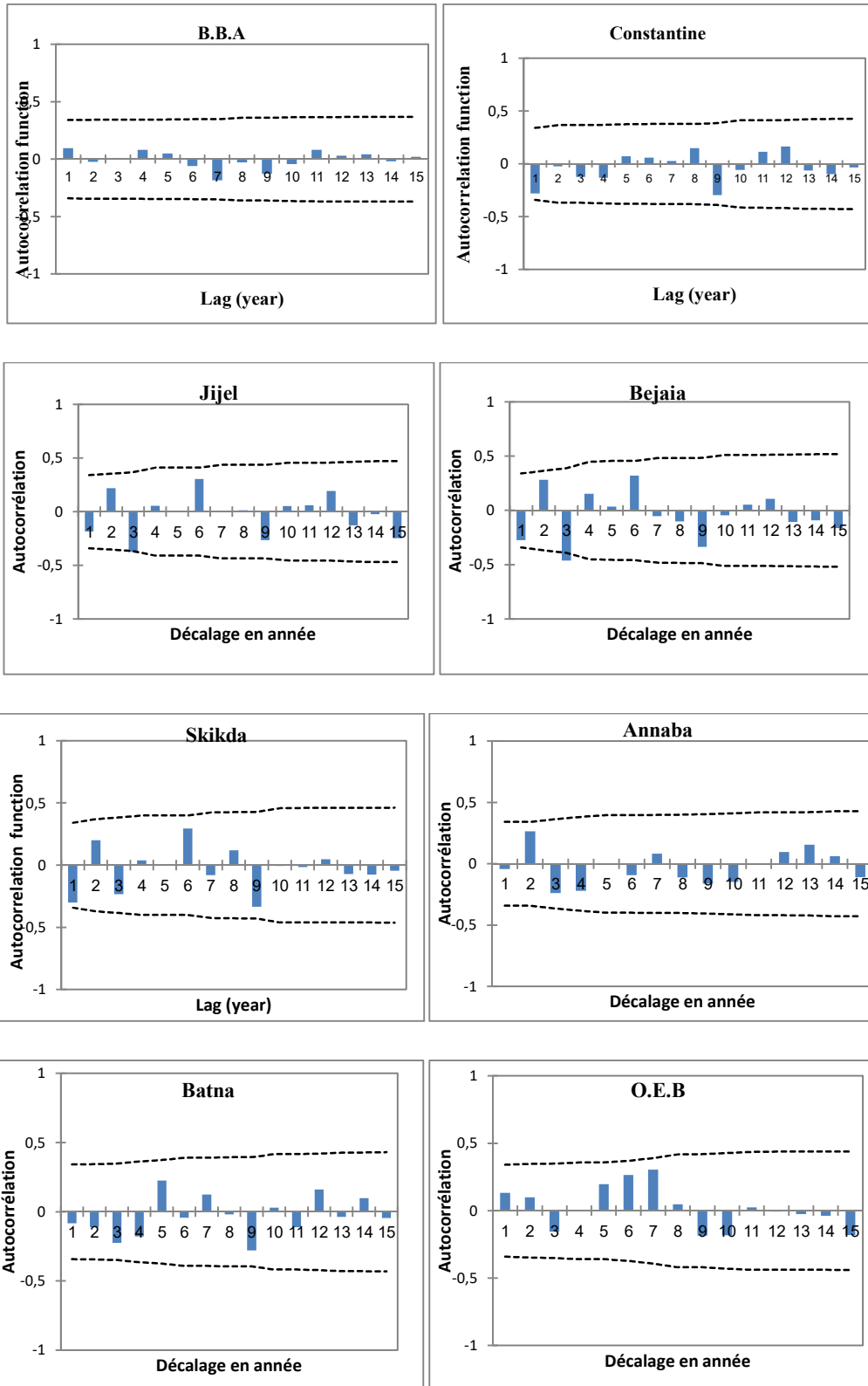
Si une série chronologique est aléatoire, alors pour n grand, $R_k \approx 0$ pour toute valeur de k non nulle. En fait, pour une série chronologique aléatoire, et pour n grand, R_k suit approximativement une distribution normale de moyenne nulle et de variance $1/n$. Il est donc possible de définir une région de confiance contenant pour un seuil de confiance donné, sous l'hypothèse nulle, l'autocorrélogramme (Chatfield, 2000). Pour un seuil de confiance $1 - \frac{\alpha}{2}$ donné, l'intervalle de confiance est définie par :

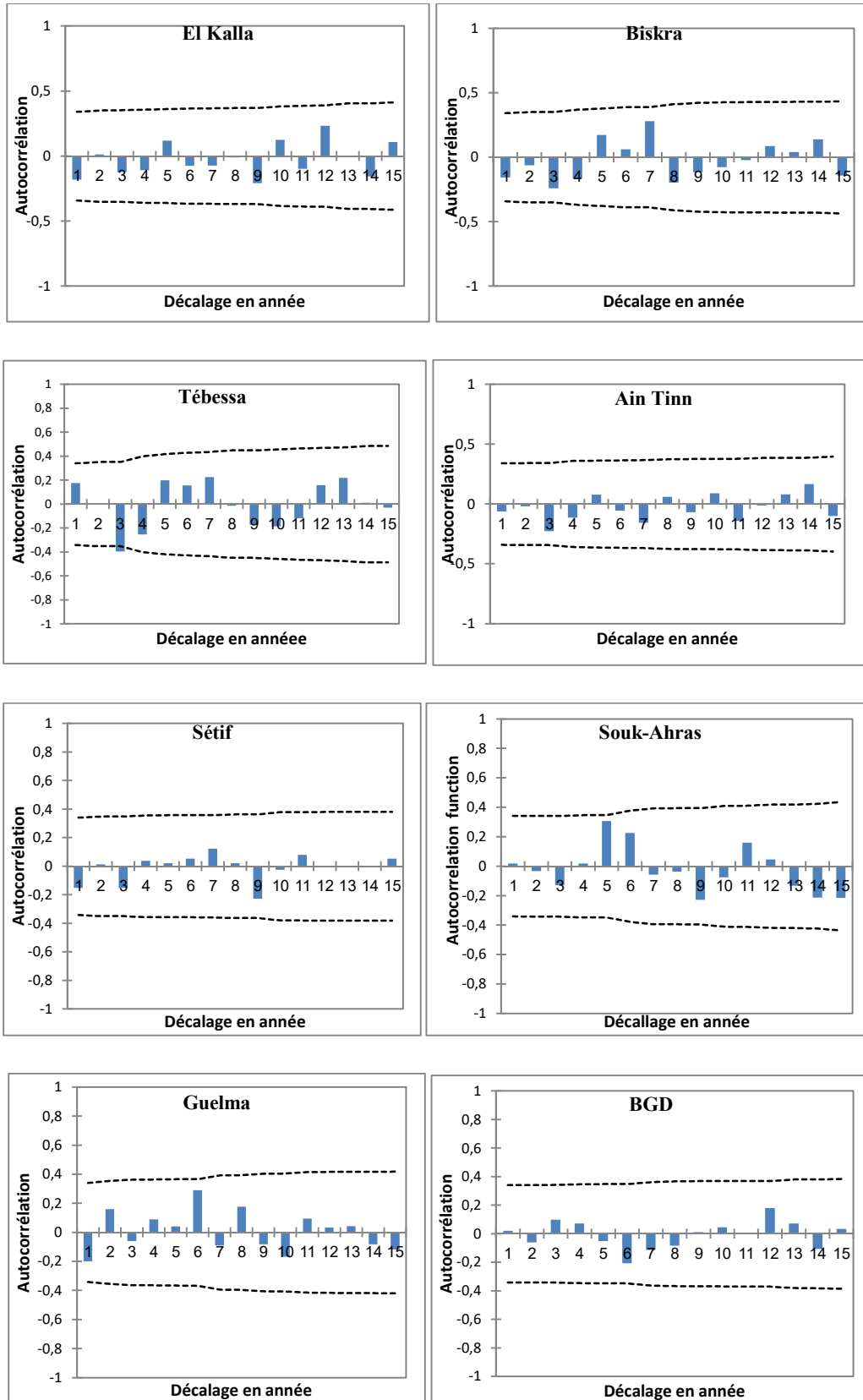
$$CI = \frac{Z_{\alpha} - \alpha/2}{\sqrt{n}}$$

Z désigne la variable normale réduite.

Une importance particulière doit être accordée au comportement de l'autocorrélogramme pour de faibles valeurs de k , notamment, pour $k = 1$ (OMM, 1966). En effet, sur les vingt premières valeurs de R_k , il n'est pas rare qu'une valeur sorte de la région de confiance même lorsque la série est réellement aléatoire.

Les séries des précipitations annuelles sont testées afin de déceler la présence ou l'absence d'une organisation dans les séries chronologiques des données climatiques. Cependant, l'application de l'autocorrélogramme d'ordre 1, au seuil 0,05, a montré que les séries retenues des pluies annuelles dans le Nord-Est algérien sont totalement aléatoires, car le coefficient d'autocorrélation, décroît rapidement vers la valeur nulle, c'est-à-dire, le coefficient d'autocorrélation n'est pas significativement différent de 0 pour toutes les valeurs de $k \leq 15$. Autrement dit, Le calcul des coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 sur les séries de pluies annuelles des 22 postes pluviométriques fournit des valeurs généralement inférieures à la valeur limite au seuil de 95%. Ce qui traduit une indépendance forte entre les valeurs successives des pluies annuelles (figure 12).





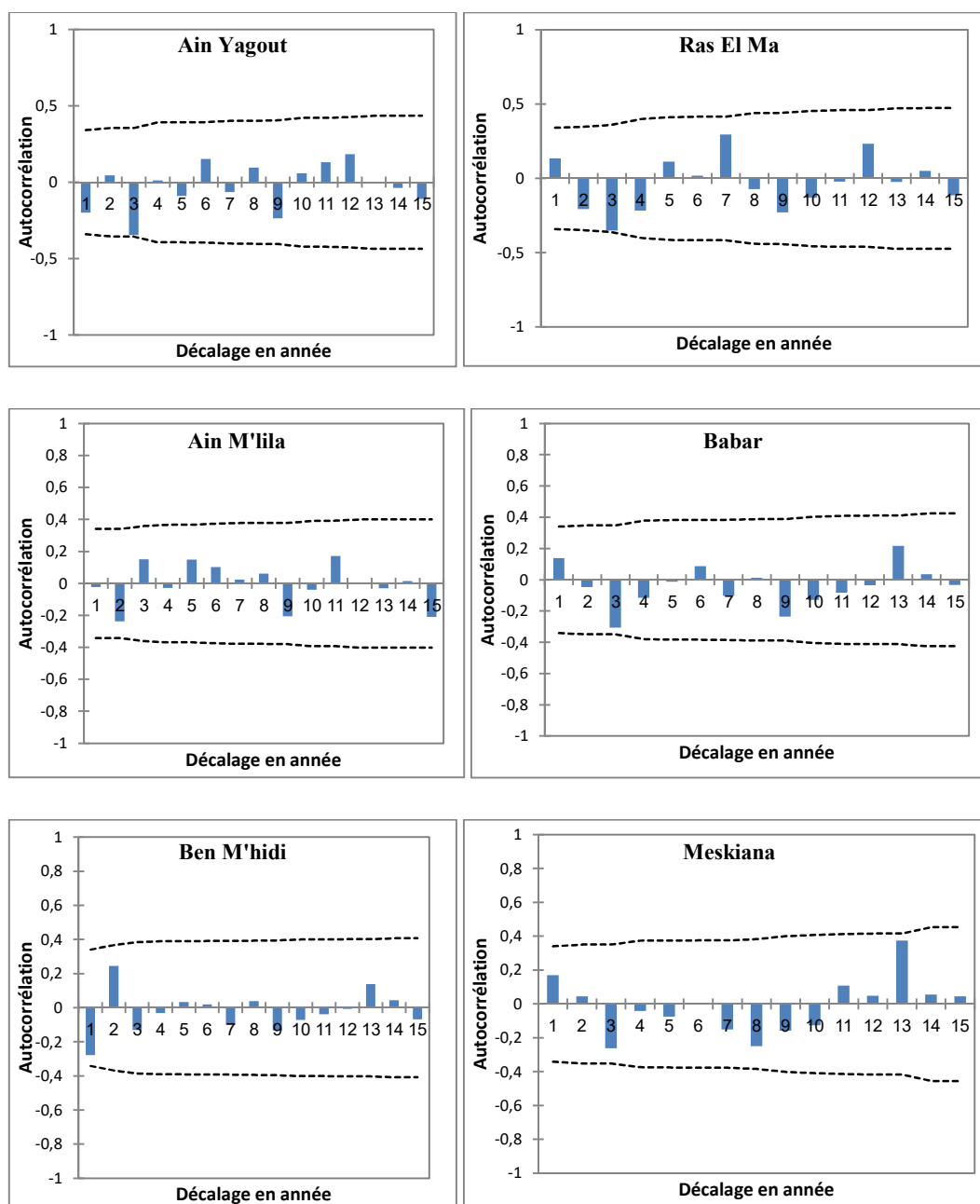


Figure 12: Autocorrélogrammes annuels des stations de la région d'étude pour la période 1978-2010.

IV.2.2. Méthodes de détection de tendances des précipitations annuelles au Nord-Est algérien

En climatologie, la tendance est une caractéristique intéressante qui résume le comportement d'un élément sur la durée. Selon Bellah et Amarchi (2016), dans le cas des précipitations, c'est une forme d'inconstance pluviométrique caractérisée par une baisse ou une hausse régulière et unidirectionnelle des valeurs moyennes des précipitations. La plupart du temps, ce sont les tendances linéaires d'une série chronologique qu'on examine,

mais parfois il peut se révéler préférable de décrire la tendance selon une forme non linéaire, notamment une courbe ou un changement abrupt de pente vers le haut ou vers le bas.

Pour évaluer les tendances dans les séries chronologiques, nous avons utilisé quatre (04) méthodes ; la méthode de la régression linéaire, le test tau de Kendall (Kendall, 1975) pour calculer la probabilité de l'existence d'une tendance au seuil de 95%, la méthode de calcul de pente de Sen (Sen, 1968) pour évaluer la tendance monotone lorsqu'elle est détectée et statistiquement significative au seuil de 95 %. Par la suite, afin de s'assurer que les tendances identifiées et leur ampleur ne dépendaient pas uniquement de la méthode utilisée et de l'incertitude inhérente associée à cette méthode en particulier, une autre méthode non paramétrique est appliquée, soit ; la méthode du coefficient des rangs de Spearman (Dahman et Hall, 1990). Enfin, pour déceler d'éventuelles tendances internes et secondaires, on a opté pour la méthode des moyennes mobiles.

IV.2.2.1. La régression linéaire simple

L'évolution sur le long terme est analysée par régression linéaire. Cette méthode est très souvent utilisée pour les variables climatiques. La régression linéaire simple cherche à expliquer les valeurs prises par une variable (y) par les valeurs prises par une autre variable (x), ces deux variables étant supposées avoir entre elles une relation linéaire (Sokal et Rohlf, 1981). Cette méthode peut en effet être utilisée pour estimer une tendance linéaire d'une grandeur en ajustant un modèle du type :

$$Y = ax + b$$

où la droite obtenue, dite des moindres carrés, est caractérisée par une pente b et une ordonnée à l'origine a . La distinction est faite entre les valeurs estimées (Y) et les valeurs observées (y).

La régression linéaire simple cherche à faire passer une droite (au sens des moindres carrés) à travers le nuage de points représentant les données dans le plan (x, y).

A partir de la valeur de a , on peut déterminer l'orientation de la pente de la droite d'ajustement. Théoriquement,

$a < 0$, indique une évolution à la baisse des précipitations annuelles;

$a > 0$, montre une évolution à la hausse des pluies annuelles;

$a \approx 0$, la série pluviométrique annuelle est constante.

Tableau 7: Evolution générale des pluies annuelles exprimée par la valeur de a

Stations	a	Stations	a
B.B.A	3.54	ATN	-0.44
CTN	-1.64	SET	2.39
JIJ	4.98	SAH	4.94
BEJ	1.1	GMA	4.97
SKI	0.95	BGD	3.46
ANN	-1.07	AYG	1.06
BAT	1.01	RMA	0.75
O.E.B	4.08	AML	3.23
ELK	-1.36	BAB	0.39
BIS	0.76	BMH	-1.66
TEB	2.76	MES	1.12

D'après le tableau 7 et les courbes de tendance (Annexe I), qui montrent l'évolution des totaux pluviométriques annuels dans le Nord-Est algérien, on constate que la quasi-totalité des stations étudiées présente des valeurs positives du coefficient a , ce qui signifie que la tendance pluviométrique se caractérise par des tendances à la hausse. Les plus fortes augmentations sont enregistrées au niveau des stations de Jijel (4.98 mm/an), Guelma (4.97mm/an), Souk-Ahras (4.94 mm/an), O.E.B (4.04mm/an), alors que les plus faibles valeurs sont observées dans les stations du sud tel que Babar (0.39 mm/an), Ras Elma (0.75 mm/an) et Biskra (0.76 mm/an).

Les stations situées surtout dans l'extrême Est de la région d'étude (Annaba, El Kalla, et Ben Mhidi), en haute altitude (Ain Tinn), et celle de Constantine sont caractérisées par une évolution régressive des pluies annuelles de faible amplitude. Les plus fortes diminutions sont enregistrées au niveau des stations de Ben Mhidi et Constantine, avec un taux de -1.66 mm/an et -1.64 mm/an, respectivement. La baisse de l'évolution dans ces stations paraît comme un caractère exceptionnel et non comme une évolution qui s'inscrit dans la chronologie des variations normales des précipitations dans la région d'étude.

En résumé, nous constatons une tendance générale à la hausse des pluies annuelles sur la majorité du Nord-Est algérien, sauf pour la région de l'extrême Nord-Est et certains endroits des hauts plateaux.

Cette analyse par la méthode de la régression linéaire n'a pour objectif que de mettre en évidence la tendance en hausse ou en baisse. Cependant, pour connaître si cette variation est significative ou non, on utilisera le test de Mann Kendall.

IV.2.2.2. Test de Mann Kendall et valeur estimée des pentes

a) Test de Mann Kendall

Le test de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendal, 1975) permet de tester la stabilité de la moyenne et de la variance des séries climatiques sur une période donnée. C'est un test non paramétrique. Selon Lanzante (1996), il a l'avantage d'être moins sensible aux valeurs singulières et à la non-normalité des séries par rapport à d'autres méthodes paramétriques classiques.

Nous avons utilisé ce test pour détecter d'éventuelles tendances dans les séries des pluies annuelles dans les stations étudiées. Il est habituellement utilisé pour évaluer la tendance d'une série chronologique (Da silva *et al.*, 2015 ; Sayemuzzaman et Jha, 2014 ; Longobardi et Villani, 2010). La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit:

$$S = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^j \text{sign}(X_i - X_j)$$

où X_i et X_j sont les valeurs séquentielles des données et N la longueur de l'ensemble des données. La statistique du test est calculée en dénombrant, pour tous les couples (X_i, X_j) $i < j$, le nombre de cas où la seconde valeur est supérieure à la première et le nombre de cas où la seconde est inférieure, puis en faisant la différence entre ces deux quantités.

Lorsque S est élevé et positif, cela signifie que la tendance est à la hausse, et une valeur négative très faible indique une tendance à la baisse. La variance de S est donnée par :

$$V(X) = \left[N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] / 18$$

Où N est le nombre de données non manquantes, t_i le nombre de valeurs dans le $i^{\text{ème}}$ groupe et m le nombre de rang ex aequo. (Yenigun *et al.*, 2008; Mrad *et al.*, 2018).

La valeur de S et de $V(S)$ servent au calcul du test statistique standardisé Z_{MK} qui s'écrit sous la formule de l'équation suivante:

$$Z_{MK} = \begin{cases} (S - 1)/\sqrt{V(S)} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ (S + 1)/\sqrt{V(S)} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur de Z_{MK} .

Une valeur négative (positive) de Z_{MK} indique une tendance descendante (ascendante) et sa significativité est comparée à la valeur critique α ou seuil de significativité du test, qui est 0.05 dans notre cas.

b) Estimateur des pentes de Sen

Si une tendance linéaire est présente dans une série chronologique des pluies annuelles, la pente réelle (variation par unité de temps) peut être estimée en appliquant une procédure non paramétrique simple mise au point par Sen (1968). Les estimations de la pente de n paires de données sont d'abord calculées par :

$$Q_i = \frac{(X_j - X_K)}{j - K} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n$$

où X_j et X_K sont des valeurs de données aux moments j et K ($j > K$) respectivement (Partial et Kahya, 2006 ; Da silva *et al.*, 2015). La médiane de ces n valeurs de Q_i est l'estimateur de la pente de Sen. Si n est impair, alors l'estimateur de Sen est calculé par $Q_{med} = Q_{[N+1/2]}$ et si n est pair, alors l'estimateur de Sen est calculé par :

$$Q_{med} = \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]}}{2}$$

Le signe Q_{med} reflète la direction de la tendance des données, tandis que sa valeur indique la pente de la tendance.

Le test de MK est directement appliqué aux séries des pluies annuelles pour la période (1978-2010) afin de détecter la tendance à un niveau de signification de 5%. Les résultats de MK sont présentés dans le tableau 8. Cependant, pour les pluies annuelles, aucune station n'a une tendance statistiquement significative. Les valeurs négatives ou positives des taux de Kendall suggèrent respectivement des tendances négatives ou positives. En d'autres termes, pour toutes les stations étudiées ; il y'a pas de changement observé, c'est-à-dire que les tendances sont non statistiquement significative. Pour Traboulsi (2010), il est toujours délicat et difficile de vouloir dégager des tendances concernant l'évolution des précipitations annuelles. Celles ci ne peuvent être perçues que

sur le relatif court terme. Nos résultats sont conformes avec ceux trouvés par Taibi *et al.* (2015), Fratianni et Acquavota (2010) et Philandras *et al.* (2011) dans leurs études pour les régions Méditerranéennes. Ces résultats peuvent donc poser comme hypothèse que l'ensemble de la région d'étude connaît la même tendance d'évolution des précipitations annuelles. Dès lors, l'apparente pénurie en eau constatée suite à des enquêtes de terrain dans différentes régions de l'Est algérien aurait pour origine les fortes augmentations des ponctions depuis l'introduction du moteur, effectuées dans les nappes superficielles.

Tableau 8: Tendances des précipitations annuelles dans les différentes stations au seuil de 95%.

Stations	Tendance annuelle (tau de Kendall)	p-value	Stations	Tendance annuelle (tau de Kendall)	p-value
BBA	0,231	0,06	ATN	-0,015	0,91
CTN	-0,098	0,43	SET	0,147	0,23
JIJ	0,147	0,23	SAH	0,125	0,31
BEJ	0,041	0,74	GMA	0,215	0,08
SKI	0,053	0,67	BGD	0,174	0,16
ANN	0,011	0,93	AYG	0,047	0,71
BAT	0,034	0,79	RMA	0,041	0,74
OEB	0,231	0,06	AML	0,170	0,16
ELK	-0,038	0,76	BAB	0,026	0,84
BIS	0,079	0,52	BMH	-0,056	0,65
TEB	0,180	0,14	MES	0,090	0,46

IV.2.2.3. Test de corrélation des rangs de Spearman

Le test de corrélation des rangs de Spearman est un test non paramétrique. Il sert à rechercher l'existence d'une tendance linéaire et à déterminer l'existence d'une corrélation entre deux séries d'observations. Ce coefficient utilise les rangs des observations et non leur valeur en tant que telle. La statistique du test de corrélation des rangs de Spearman est basée sur le coefficient de corrélation du rang de Spearman r :

$$r = 1 - 6 \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n di^2}{n(n^2 - 1)} \right\}$$

où i représente l'ordre chronologique et n est le nombre total des points de données dans la série. $di = RXi - RYi$; est l'écart entre les rangs où RXi est le rang de la variable Xi (année i), qui est l'ordre chronologique des observations. La série d'observations Yi (valeur du

paramètre considéré pour X_i) est transformée en son rang équivalent RY_i en évaluant l'ordre chronologique dans la série classée.

On ne cherche pas à imposer la droite comme modèle d'évolution. Un test t de Student permet de décider si la valeur de r est significative ou pas au seuil de confiance de 95 %.

La statistique du test t est donnée par :

$$t = r \sqrt{\frac{(n-2)}{((1-r)^2)}}$$

Cette statistique suit une distribution t de Student avec des degrés de liberté $n = n-2$ et niveau de signification α .

Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre les valeurs théoriques de la variable de Student de probabilité de non dépassement respectivement égale à α et $1-\alpha/2$.

Les tendances statistiquement significatives ont été définies comme étant celles qui se situent en dessous du seuil $p < 0,05$.

Cette méthode non paramétrique, utilisée pour identifier, quantifier et vérifier la tendance sur les séries des précipitations annuelles pour les stations du Nord-Est algérien a permis d'obtenir des résultats similaires à celles obtenues par la méthode de Mann Kendall. Toutes les stations ne présentent pas des tendances significatives. De même le sens des tendances non significatives est analogue à celles analysées par la méthode de Mann Kendall. De ce fait, seul le test de ce dernier et la valeur de la pente calculée à partir de la méthode de Sen qui sont analysées. Le tableau 9 donne la répartition entre hausses et baisses, significatives (en gras) ou pas au sens du coefficient de Spearman au seuil de 95 %, pour les précipitations annuelles sur la période 1978-2010 pour le Nord-Est algérien.

Tableau 9: Résultats des tests de corrélation du rang de Spearman pour les précipitations annuelles sur la période de 1978 à 2010.

Stations	Rho (r)	p-value	Stations	Rho (r)	p-value
BBA	0,33	0,056	ATN	-0,04	0,78
CTN	-0,14	0,41	SET	0,25	0,15
JIJ	0,24	0,16	SAH	0,21	0,23
BEJ	0,07	0,67	GMA	0,29	0,09
SKI	0,06	0,71	BGD	0,24	0,17
ANN	0,01	0,94	AYG	0,08	0,64
BAT	0,07	0,68	RMA	0,02	0,87
OEB	0,25	0,07	AML	0,26	0,13
ELK	-0,03	0,84	BAB	0,01	0,91
BIS	0,11	0,52	BMH	-0,08	0,64
TEB	0,31	0,07	MES	0,14	0,43

IV.2.2.4. Les moyennes mobiles pour les précipitations annuelles

Afin de dégager la forme, le sens ou la tendance d'une évolution dans une série chronologique de variables, dans notre cas les pluies annuelles, les moyennes mobiles (ou glissantes) sont utilisées pour analyser les séries statistiques temporelles en supprimant les fluctuations transitoires, c'est-à-dire, passer d'une courbe en dents de scie à une courbe plus significative pour l'analyse courante. Ces courbes de moyennes mobiles arithmétiques sont dépendantes du temps de base choisi pour le calcul de ces moyennes (généralement compris entre 5 et 10 ans).

Chaque observation est remplacée par une moyenne arithmétique calculée sur la valeur de cette observation (X_i) et les valeurs voisines qui l'encadrent. Dans le cadre de cette étude la période retenue est de sept (07) ans, car la durée des observations est moyennement longue. Ces moyennes lissées réduisent l'amplitude des fluctuations interannuelles et font mieux ressortir la courbe des tendances, et par conséquent les résultats sont plus commodes à interpréter. Cependant, (X_i) est remplacé dans la série par :

$$X = \frac{X_{i-3} + X_{i-2} + X_{i-1} + X_i + X_{i+1} + X_{i+2} + X_{i+3}}{7}$$

Nous avons considéré les précipitations annuelles des 22 stations étudiées. L'analyse visuelle des graphes représentés par les courbes des figures en (Annexe I), lissées sur sept ans, permettent de rechercher d'éventuelles tendances internes (figure 13).

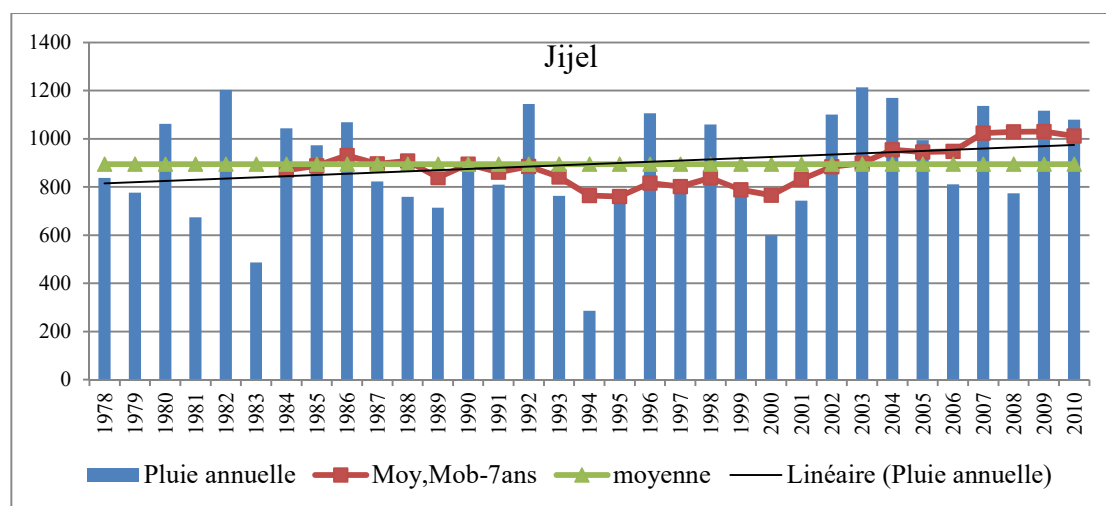


Figure 13: Tendence linéaire des pluies annuelles et moyenne mobile sur 7 ans à la station de Jijel.

Selon ces figures, la tendance interne des précipitations annuelles moyennes a montré des résultats qui ne sont pas différents par rapport au test de MK. En effet, il n'y a pas de tendance interne distincte des précipitations dans les séries chronologiques étudiées. En effet, on constate que les courbes présentent des pics et des creux montrant une fluctuation assez forte, ce qui rend difficile de dégager des tendances secondaires et des cycles, ce qui est justifiée par les résultats présentés dans les études de Mred *et al.* (2018) et Bessaklia *et al.* (2018) sur la tendance des précipitations dans le Nord-Est de l'Algérie.

D'après ces mêmes figures, on constate la même dynamique d'ensemble de la moyenne mobile sur sept ans des précipitations annuelles est valable au Nord-Est algérien (Annexe I). Néanmoins, on constate que ces dynamiques ne caractérisent pas uniformément toutes les stations étudiées. La présence des décalages de phases apparaissent entre les stations de la région d'étude. En effet, on remarque des nuances régionales assez perceptibles entre le Nord et le Sud d'une part, et entre l'Est et l'Ouest d'autre part.

Les courbes de moyennes mobiles des stations littorales montrent un caractère relativement stable autour de la moyenne ou excédentaire depuis les années 1980 jusqu'au fin des années 1990. Certains épisodes à la baisse sont observés durant la fin des années 1990 et le début des années 2000. Puis, depuis la fin des années de ces dernières jusqu'à nos jours, cette zone a connue une période de stabilité (cas d'Annaba et d'El kala) ou une période excédentaire (cas de Jijel, Skikda et Bejaia). Sur les hauts plateaux et le piedmont sud les courbes présentent des fluctuations plus au moins stables autour de la moyenne,

durant la période d'étude, avec une légère phase de hausse à partir du début des années 2000, cas des stations Batna, Tébessa, Sétif, Ras El Ma, Ain Tinn, Constantine, Biskra.

Les graphes des stations de Guelma, O.E.B, et d'Ain Mlila présentent des courbes de deux phases à tendance dominantes. La première période déficitaire s'étale entre 1978 et la moitié des années 1990, et la deuxième phase excédentaire débute dès le début des années 2000 pour les 02 premières stations et une phase stable pour la dernière station.

IV.2.3. Tests de détection de ruptures dans les séries des pluies annuelles

Une rupture peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires (X_i) dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées, le plus souvent inconnu. (Lubès *et al.*, 1994)

En vue de détecter une éventuelle rupture liée à une non-stationnarité, les séries de précipitations annuelles du Nord-Est algérien, pour la période 1978-2010, ont été soumises à une série de tests statistiques de rupture en moyenne: test Pettitt (1979), statistique U de Buishand (1982, 1984), l'approche bayésienne de Lee et Heghinian (1977) et la méthode de segmentation de Hubert (Hubert *et al.*, 1989). Pour l'ensemble de ces tests, l'hypothèse nulle (H_0) correspond à l'absence de rupture. Les trois premiers tests ont été mis en œuvre avec un risque de première espèce de 5%. Dans la procédure de segmentation non paramétrique proposée par Hubert, le niveau de signification du test de Scheffé est de 1%. Nous avons recours à ces méthodes, d'usage très répandu dans des analyses pareilles, en raison de leur robustesse et de leur facilité de mise en œuvre. Elles sont d'ailleurs recommandées par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO, 2002). Ces tests sont particulièrement sensibles à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, ils proposent une estimation de la date de rupture. Toutes ces méthodes sont adaptées à la détermination d'une rupture unique à l'exception de la méthode de Hubert, qui propose plusieurs dates de rupture. On présentera les méthodes utilisées et les résultats obtenus dans ce que suit.

IV.2.3.1. Test de pettitt

Le test de Pettitt est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population (Pettitt, 1979). La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable U_t, N définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

Avec $i = 1, N$ et avec $j = t + 1, N$

Où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(z) = 1$ si $z > 0$; $\text{sgn}(z) = 0$ si $z = 0$ et $\text{sgn}(z) = -1$ si $z < 0$

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$. Si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(-6k^2 / (N^3 + N^2)\right)$$

Pour un risque α de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment ou est observée $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$

Le test de Pettitt est réputé pour sa robustesse à détecter une rupture dans une série chronologique (Lubès *et al.*, 1994).

IV.2.3.2. Statistique U de Buishand

Ce test proposé par Buishand (1982, 1984) est de nature bayésienne. Il est basé sur les hypothèses de normalité et de la constance de la variance de la série. En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture, la statistique U est définie par :

$$U = [N(N + 1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x}\right)^2$$

Où $S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$ pour $k = 1, 2, 3, \dots, N$ et D_x est l'écart type de la série.

L'hypothèse nulle est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982, 1984) à partir d'une méthode de Monte Carlo. Cette méthode donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série et s'avère donc plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au milieu de la série. La statistique U est robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité.

Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . Cette méthode complète le test de la statistique U de Buishand. Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k sous l'hypothèse nulle.

IV.2.3.3. La Procédure Bayésienne de Lee & Heghinian (Lubes et al. 1994)

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. Le modèle de base est le suivant:

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases}$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Les variables τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. Ce changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions a posteriori de τ et δ . La méthode fournit la probabilité que le changement se produise au moment τ dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même elle donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur δ .

IV.2.3.4. Procédure de segmentation d'Hubert

Cette procédure consiste à découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la façon suivante :

Toute série x_i , $i = i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$, où ($i_1 < i_2$) constitue un segment de la série initiale des (x_i) , avec $i = 1, \dots, N$. Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m définie par :

i_k , $k = 1, 2, \dots, m$ le rang dans la série initiale de l'extrémité du $k^{\text{ième}}$ segment;

$n_k = i_k - i_{k-1}$ la longueur du $k^{\text{ième}}$ segment;

$\bar{x}_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i / n_k$ la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment;

La quantité $D_m = \sum_{k=1}^{k=m} D_k = \sum_{k=1}^{k=m} \sum_{i_{k-1}+1}^{i_k} (x_i - \bar{x})^2$ est l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes. Cette contrainte est satisfaite par application du test de Scheffé qui repose sur le concept de contraste (Dagnélie, 1970).

D'après Hubert *et al.* (1989), cette procédure de segmentation peut être regardée comme un test de stationnarité, « la série étudiée est stationnaire », constituant l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée.

IV.2.3.5. Résultats

Les résultats des tests de Pettitt, Buishand, Lee et Heghinian et segmentation de Hubert appliqués aux précipitations annuelles pour les stations du Nord-Est algérien pour la période 1978-2010 sont résumés dans le tableau 10. Ces tests statistiques sont adaptés à la détection d'une rupture dans une série chronologique.

L'examen de ces résultats permet de constater que les tests de Pettitt et Buishand soulignent l'acceptation de H_0 , donc l'inexistence d'une rupture significative pour les vingt deux stations étudiées. Ces observations confirment l'évolution de la tendance des précipitations annuelles analysée par le test de Mann-Kendall au risque de première espèce de 5%.

La procédure de segmentation de Lee et Heghinian a détecté des ruptures significatives dans 77 % des stations étudiées, mais présentent des périodes de ruptures très éloignées, malgré que certaines stations sont proches. Cette situation semble être liée à la forte variabilité interannuelle naturelle des précipitations. La moitié de ces changements brusques détectés sont situés après l'an 2000. En ce qui concerne, la segmentation de Hubert, elle n'a détecté de rupture significative qu'en quatre stations (BBA, O.E.B, SAH, BGD), avec des années de rupture qui se localisent après 2000, pareil à la précédente. Pour Niel *et al.* (2009), Une attention particulière doit être portée sur l'interprétation des résultats de la segmentation. En effet son principe de calcul conduit parfois à déterminer des segments de très courte durée (au minimum une seule valeur) correspondant à l'occurrence de peu d'années (une seule parfois) très sèches ou très humides c'est-à-dire à

de très courtes périodes de valeurs extrêmes. Ainsi certaines dates de rupture ne sont retenues que par cette procédure, mais dans ce cas le terme de rupture n'a pas son sens statistique originel. Ce type de dates est dites parasite. En plus, pour Hallouz *et al.* (2011), une rupture faible signifie qu'elle est détectée par un seul test, ce qui indique donc une probabilité plus faible de rupture ou un événement de moindre amplitude. Une rupture probable signifie que la rupture est détectée par au moins 2 tests statistiques. Une rupture avérée signifie que la rupture est détectée par trois tests, ce qui indique donc une probabilité importante de rupture ou un événement de grande amplitude. Pour cela, on a considéré qu'une rupture probable vers les années 2000 semble dominée. On propose donc l'année 2002 comme année de rupture pour les stations suivantes ; BBA, O.E.B, SAH, BGD.

Tableau 10: Dates de rupture dans les séries pluviométriques de la période 1978-2010

Station	Test de Buishand	Test de Pettitt	Test de Lee Heghinian	Segmentation d'Hubert	Pluie moy avant rupture	Pluie moy après rupture
BBA	acceptée	acceptée	2002	2002	330,916	437,55
CTN	acceptée	acceptée	acceptée	acceptée		
JIJ	acceptée	acceptée	2001	acceptée		
BEJ	acceptée	acceptée	2001	acceptée		
SKI	acceptée	acceptée	2008	acceptée		
ANN	acceptée	acceptée	1986	acceptée		
BAT	acceptée	acceptée	acceptée	acceptée		
OEB	acceptée	acceptée	1995	2002-2004	335,46	626,6
				2005	626,6	384,16
ELK	acceptée	acceptée	2004	acceptée		
BIS	acceptée	acceptée	acceptée	acceptée		
TEB	acceptée	acceptée	1989	acceptée		
ATN	acceptée	acceptée	acceptée	acceptée		
SET	acceptée	acceptée	1981	acceptée		
SAH	acceptée	acceptée	2002	2002	640,516	829,7
GMA	acceptée	acceptée	1989	acceptée		
BGD	acceptée	acceptée	2002	2006	330,348	362,03
AYG	acceptée	acceptée	acceptée	acceptée		
RMA	acceptée	acceptée	2002	acceptée		
AML	acceptée	acceptée	2002	acceptée		
BAB	acceptée	acceptée	2009	acceptée		
BMH	acceptée	acceptée	1986	acceptée		
MES	acceptée	acceptée	2001	acceptée		

Le pourcentage relatif de variation de la pluie moyenne interannuelle entre les deux périodes considérées a été calculé. Il est égal au rapport :

$$\frac{\text{moyenne des pluies annuelles avant rupture} - \text{moyenne des pluies annuelles après rupture}}{\text{moyenne des pluies annuelles avant rupture}} \times 100$$

Le tableau 11 rassemble les stations ayant une rupture probable. Il ressort que pour ces stations qui ont des ruptures probables, une augmentation de la pluviométrie annuelle. La plus importante augmentation pluviométrique est enregistrée au niveau des stations d'O.E.B (33,86 %), BBA (32,22 %) et SAH (29,54 %), localisées sur les hauts plateaux et l'extrême Est de l'Atlas tellien, tandis que la station de BGD enregistre un taux modéré (9,59 %). Pour ces stations, l'augmentation pluviométrique n'est pas significative selon le test de Mann Kendall.

Tableau 11: Caractéristiques des changements détectés pour les stations ayant une rupture probable.

Station	Test de Buishand	Test de Pettitt	Test de Lee Heghinian	Segmentation d'Hubert	Pluie moy avant rupture	Pluie moy après rupture	Taux de Variation (%)
BBA	acceptée	acceptée	2002	2002	330,91	437,55	32,22
O.E.B	acceptée	acceptée	1995	2002	331,36	443,56	33,86
SAH	acceptée	acceptée	2002	2002	640,51	829,7	29,54
BGD	acceptée	acceptée	2002	2006	330,34	362,03	9,59

Chapitre V : Variabilité spatio-temporelle du nombre de jours de pluie par an au Nord-Est algérien

La variabilité spatio-temporelle des jours de pluie a été très peu étudiée au cours des travaux antérieurs en Algérie. Cela pourrait se justifier par la difficulté de l'acquisition de données journalières, fiables et comportant peu de lacunes. Pourtant, du point de vue climatologique, l'analyse des jours pluvieux peut contribuer à améliorer les connaissances sur les aspects des déficits pluviométriques mensuels et annuels ainsi que sur les changements susceptibles d'affecter l'évolution des précipitations (Kouassi *et al.*, 2010). L'intérêt de ce type d'étude réside dans le fait que les événements extrêmes devraient devenir plus fréquents suite au réchauffement climatique (Houghton *et al.*, 2001). Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a recommandé le développement de bases de données de précipitations quotidiennes denses et robustes pour permettre l'analyse des tendances du nombre de jours de pluie (Nicholls et Murray, 1999 ; Moberg et Jones, 2005).

Dans le monde, un réseau dense d'observations, avec des données longues et de qualité fiable n'est pas disponible. Toutefois, au cours des dernières décennies, un grand nombre de chercheurs ont participé à la collecte des données journalières disponibles pour des régions. En conséquence, il a été possible d'effectuer des analyses de tendance sur les précipitations quotidiennes dans différentes zones géographiques dans le monde ; la région méditerranéenne (Norrant et Douguedroit, 2006; Rodrigo et Trigo, 2007 ; Brunetti *et al.*, 2000, 2001), Afrique du sud (Kruger, 2006), l'Amérique du Nord (Michaels *et al.*, 2004), le Centre et l'Ouest Europe (Moberg et Jones, 2005), l'Inde (Sen-Roy et Balling, 2004), et l'Asie (Griffiths *et al.*, 2003).

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de la variabilité spatio-temporelle du nombre de jours de pluie par an pour le Nord-Est algérien sur la période 1978-2010. L'analyse a été basée sur une base de données récente et dont la qualité est contrôlée, composée de 14 séries de précipitations quotidiennes. Il sera considéré comme pluvieux un jour où la hauteur de pluie relevée est supérieure à une valeur déterminée appelé seuil, en une station pluviométrique donnée.

Le nombre de jours pluvieux par an a été calculé à partir des séries journalières de pluies. Pour ce faire, nous nous intéresserons particulièrement au nombre et à la répartition des

jours pluvieux dans le Nord-Est algérien, ainsi qu'à leurs impacts sur les cumuls annuels. La méthodologie adoptée est la même utilisée dans le chapitre précédent pour la variabilité des pluies annuelles.

V.1. Variation spatiale du nombre de jours de pluie et relations avec les cumuls annuels

On constate que la variation moyenne du nombre de jours de pluie a varié de façon marquée dans toute la zone d'étude, sans doute à l'image de celle des cumuls annuels, en raison de l'hétérogénéité climatique de la région. Cependant, le nombre de jours de pluie varie entre 113,51 dans le nord (Annaba) et 36,27 dans l'extrême sud de la zone d'étude (Biskra), soit 31 % et 9,93 % des jours en moyenne par an reçoivent au moins 1mm de pluie, respectivement, suivant un gradient pluviométrique Nord - Sud. La moyenne du nombre de jours de pluie est de 93,28 sur la période 1978-2010 pour le Nord-Est algérien. Les stations du littoral enregistrent donc les valeurs moyennes de nombre de jours de pluie les plus élevées (113,51 à Annaba, 109,81 à Jijel et 100,33 à Bejaia) que les stations des hauts plateaux et celle du piedmont sud de l'Atlas saharien (85,66 à Tébessa, 83,09 à O.E.B, 78,66 à Batna et 36,27 à Biskra). Ces différences s'expliquent par la proximité de la mer méditerranée des stations côtières, qui sont sous l'emprise des flux humides quasiment toute l'année (tableau 12).

La dispersion spatiale entre stations du même domaine pluviométrique est peu importante, témoignant sans doute de l'homogénéité de l'influence des processus de surface continentale par rapport aux lignes de flux. (Cas des stations de Sétif (103,45) et de B.B.A (98,33), ainsi que celles de Guelma (97,66) et de Souk Ahras (96,84).

Les variations expliquées entre les précipitations annuelles et le nombre de jours de pluies sont moyennement hautes pour les stations de Bejaia et de Batna, avec un coefficient de corrélation significatif égale à 0,74 et 0,73 respectivement, modérées pour les station de Constantine, Skikda, El kalla, et Sétif (au moyenne 0,5) et relativement faible pour les stations de O.E.B et Tébessa, avec 0,41 pour chacune. Au niveau des stations de BBA et SAH, le nombre de jours pluvieux n'est pas significativement corrélé avec les précipitations annuelles au seuil 95% (tableau 12). Les totaux annuels des précipitations s'expliquent d'avantage par le nombre de jours pluvieux à Bejaia et à Batna, mais d'avantage par des précipitations isolées et des événements intenses à B.B.A et SAH. Dans le reste des stations, les précipitations annuelles sont expliquées par un équilibre entre le

nombre de jours de pluie et les pluies intenses. Pour Benhamrouche *et al.* (2015) et Ghenim et Megnounif (2016), dans le Nord de l'Algérie, la proximité de la méditerranée et la variété des reliefs environnants rendent difficile la délimitation des zones homogènes. De plus, l'instabilité barocline accrue de l'air saturé et étroitement liée au dégagement de chaleur latente et donc au développement de phénomènes convectifs. Pendant la saison des pluies, le Nord de l'Algérie est affecté par le front polaire, en particulier l'Est du pays. Plus au Sud, les hauts plateaux sont généralement affectés par les perturbations occidentales suite au forçage orographique qui provoque des orages avec des pluies intenses. Ces résultats sont concordent avec des études menées dans d'autres régions méditerranéennes (Meddi et Meddi, 2009 ; Slimani *et al.*, 2007 ; Ruiz Sinoga *et al.*, 2011 ; Mourato *et al.*, 2010).

Tableau 12: Moyenne du nombre de jours de pluie par an et relation avec les pluies annuelles.

Stations	Nombre de jours de pluie par an	R²
BBA	98,33	0,13
CTN	106,93	0,56
JIJ	109,81	0,51
BEJ	100,33	0,74
SKI	99,66	0,52
ANN	113,51	0,55
BAT	78,66	0,73
OEB	83,09	0,41
ELK	95,81	0,52
BIS	36,27	0,68
TEB	85,66	0,41
SET	103,45	0,56
SAH	96,84	0,22
GMA	97,66	0,60

V.2. Variabilité temporelle du nombre de jours de pluie par an

Au cours des dernières années, la compréhension et la prévision de la variabilité temporelle et des changements climatiques sont devenus des questions clés dans le domaine de recherches. L'intensité croissante de précipitations en termes de nombre de jours pluvieux et/ou non-pluvieux est une grande préoccupation pour les chercheurs sur le changement climatique (Sayemuzzaman *et al.*, 2014).

Les tendances des précipitations journalières ont été observées sur le dernier siècle dans beaucoup de régions du globe et ont très rapidement attiré l'attention des chercheurs. Au

Nord-Est de l'Italie, Brunetti *et al.* (2001, 2004) ont trouvé une tendance à la baisse du nombre de jours de pluie. Philandras *et al.* (2011) ont analysé la tendance du nombre de jours de pluie à l'Est de la Méditerranée et ont trouvé une réduction significative. En Algérie, très peu d'études qui ont mis en évidence la tendance du nombre de jours de pluie. Les travaux menés par certains auteurs se limitent à l'analyse des pluies maximales journalières annuelles (khoualdia *et al.*, 2014 ; Matari *et al.*, 1999 ; Ghenim et Megnounif, 2016 ; Meddi et Toumi, 2015). Alors que, pour Taibi *et al.* 2015 ont pu montrer qu'il y'a une baisse significative pour les pluies totales annuelles et des jours de pluie dans le bassin de Chélif.

Dans cette analyse nous essayons de déterminer si des variations significatives, en termes de tendances linéaires du nombre de jours de pluie se sont produites ou non dans le Nord-Est algérien de 1978 à 2010. Et en cas de variations significatives, nous avons recherché si celles-ci sont associées à des variations des précipitations annuelles. Cette analyse peut aussi contribuer à améliorer notre connaissance des déficits pluviométriques mensuels, saisonniers et annuels ainsi que les changements susceptibles d'affecter l'évolution des pluies.

V.2.1. Caractère aléatoire des séries d'observations (Application de l'autocorrélogramme)

La méthode consiste à appliquer des tests statistiques aux séries du nombre de jours de pluie par an sur la période 1978–2010, pour caractériser l'évolution de cette variable dans le Nord-Est algérien. La méthodologie appliquée est celle qui est utilisée dans le chapitre précédent pour la variabilité des précipitations annuelles.

Un des problèmes dans la détection de tendances dans les séries chronologiques hydrologiques est l'effet de l'autocorrélation. Afin d'éviter ce problème, nous avons vérifié l'autocorrélation des séries chronologiques du nombre de jours de pluie par an, dans la série 1978-2010 dans le Nord-Est algérien. Ce test a été utilisé pour tester le caractère aléatoire du nombre de jours de pluie par an de séries chronologiques par plusieurs auteurs dans différentes régions du globe (Modares et Da Silva, 2007 ; Adewi *et al.*, 2010 ; Cruz *et al.*, 2013). L'existence d'une corrélation dans les séries chronologiques peut avoir une incidence négative sur la puissance du test non paramétrique pour évaluer l'importance des tendances (Yue *et al.*, 2002).

Si la série chronologique est aléatoire, les coefficients d'autocorrélation ne sont pas statistiquement différents de zéro. Ce test est décrit en détail dans le chapitre précédent. La vérification du caractère aléatoire est donnée par le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1, au niveau de signification $\alpha = 5\%$, pour l'ensemble des séries du nombre de jours de pluie par an.

L'examen pour l'autocorrélation a été appliqué sur une base annuelle, des séries du nombre de jours de pluie, pour chacune des stations individuelles pour les données des séries de 14 stations. Cependant, la figure 14 montre l'autocorrélogramme du nombre de jours de pluie par an pour les stations de Guelma et Biskra. Le coefficient de corrélation, décroît rapidement vers la valeur nulle, donc il n'existe pas de corrélation sérielle. Les résultats sont généralisables à l'ensemble des stations étudiées (voir annexe II).

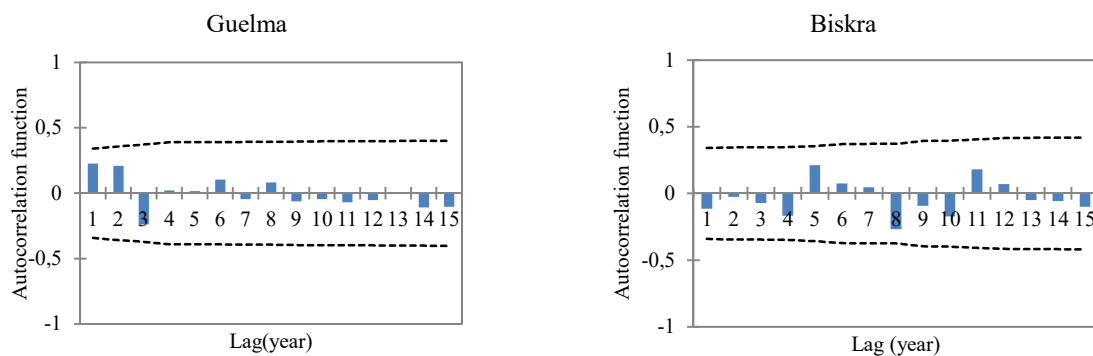


Figure 14: Fonction d'autocorrélation du nombre de jours de pluie pour les stations de Guelma et Biskra (période 1978-2010).

V.2.2. Tendances du nombre de jours de pluie par an

V.2.2.1. La régression linéaire simple

L'analyse de la régression linéaire est appliquée pour la détection et l'analyse des tendances dans les séries chronologiques. Le principal paramètre statistique tiré de l'analyse de régression est la pente, qui indique le changement temporel moyen de la variable étudiée, qui est le nombre de jours de pluie par an dans notre cas. Les valeurs positives de la pente montrent des tendances à la hausse, tandis que les valeurs négatives de la pente indiquent des tendances à la baisse. La variation totale au cours de la période d'observation est obtenue en multipliant la pente par le nombre d'années. La description

mathématique complète de cette méthode se trouve dans les études mentionnées ci-dessus (chapitre IV).

Les tendances du nombre de jours de pluie et leur ampleur (en jours/ an) obtenu par la régression linéaire sont données dans le tableau 13. Cependant, selon la régression linéaire, une tendance à la baisse qui est observée pour le nombre de jours de pluie par an dans la plupart des stations du Nord-Est algérien, à l'exception des stations de Batna, El Kalla, Biskra, Souk-Ahras et Guelma, qui présentent des tendances positives. L'importante diminution des tendances varie entre (-1.41 j/an) à la station de B.B.A et (-0.09 j/an) à la station de Skikda. La distribution de la tendance du nombre de jours de pluie a révélé que les tendances à la baisse se sont surtout manifestées dans la majorité des stations côtières de la mer Méditerranée et celles des hauts plateaux. En revanche, la tendance à la hausse varie entre (0.19 j/an) dans la station d'El Kalla et (0.41 j/an) dans la station de Batna. Elle est détectée surtout dans la partie orientale de l'Atlas tellien de la région d'étude (bassins intérieurs) et à l'intérieur de l'Atlas saharien et son piedmont sud.

Cependant, on constate que les tendances à la baisse du nombre de jours de pluie par an sont plus importantes que les tendances à la hausse dans le Nord-Est algérien.

Tableau 13: Evolution générale du nombre de jours de pluie par an exprimée par la valeur de a.

Stations	<i>a (jours/an)</i>	stations	<i>a (jours/an)</i>
BBA	-1.41	OEB	-0.92
CTN	-1.12	ELK	0.19
JIJ	-0.73	BIS	0.23
BEJ	-0.48	TEB	-0.81
SKI	-0.09	SET	-0.56
ANN	-0.65	SAH	0.23
BAT	0.41	GMA	0.29

V.2.2.2. Test de tendance de Mann Kendall et estimation de la pente de Sen

L'analyse des tendances est considérée comme l'une des plus importantes dans les problèmes liés au changement climatique mondial. Le principal objectif de l'analyse des tendances dans cette étude est de fournir un aperçu de l'évolution du nombre de jours de pluie dans le Nord-Est algérien. À cette fin, on a utilisé 33 années de relevés

météorologiques pour étudier les tendances des séries chronologiques du nombre de jours de pluie. Les climatologues et les hydrologues utilisent plusieurs méthodes pour l'estimation des tendances et de leur importance pour le nombre de jours de pluie. La méthode de Mann Kendall a été utilisée pour identifier les tendances dans les séries chronologiques et l'approche de Sen a été utilisée pour estimer l'ampleur de la pente dans les séries étudiées au cours de la période de la période d'étude, au seuil de signification de 5 %. Autrement dit, Dans cette analyse, nous avons optés pour la même méthodologie adoptée dans le chapitre précédent pour évaluer les tendances annuelles du nombre de jours de pluie.

Tableau 14: Tendances spatiales du nombre de jours de pluie dans les stations étudiées.

Stations	Tendance des jours de pluie par an	Sen's slope	p-value
BBA	-0,202	-0,741	0,103
CTN	-0,435	-1,125	0,0004
JIJ	-0,264	-0,811	0,032
BEJ	-0,198	-0,477	0,110
SKI	-0,036	-0,105	0,780
ANN	-0,217	-0,694	0,079
BAT	0,131	0,392	0,291
OEB	-0,289	-0,98	0,019
ELK	0,101	0,224	0,42
BIS	0,155	0,235	0,214
TEB	-0,307	-0,8	0,013
SET	-0,210	-0,604	0,090
SAH	0,075	0,254	0,545
GMA	0,161	0,4	0,192

Le tableau 14 indique les résultats du test de Mann-Kendall et l'approche de Sen sur le nombre de jours de pluie en termes de signification et d'ampleur (jours /année) aux stations sélectionnées dans le Nord-Est algérien pour la période 1978 - 2010.

Les tendances négatives significatives des jours pluvieux au seuil de 0,5 sont observées uniquement dans les stations de ; Constantine (-1,125 jour /an), Jijel (-0,811 jour/an), O.E.B (-0,98 jour/an) et Tébessa (-0,8 jour mm/an) (figure 15).

La figure 16 montre l'ampleur des tendances négatives significatives des jours de pluie dans quatre stations pour la période d'étude. Aucune cohérence spatiale des résultats n'apparaît. Ces résultats traduits donc un comportement régional spécifique. Les stations à tendances significatives ont leurs spécificités topographiques. La station de Jijel se situe

dans le littoral, la station de Constantine est localisée dans l'atlas Tellien, alors que les deux autres se trouvent sur les hauts plateaux.

Les tendances à la baisse et à l'augmentation enregistrées dans les autres stations ne sont pas statistiquement significatives à 95%.

Cependant, on constate que pour toutes les stations étudiées peu de changements sont enregistrés, c'est-à-dire que les tendances sont soit non statistiquement significative, soit elles présentent des valeurs très faibles quant à la diminution du nombre de jours de pluie au cours de l'année.

Le nombre de jours sans pluies est important et similaire à la Tunisie. Pour Henia et Benzarti (2006), les séquences sèches sont assez longues et peuvent s'étendre sur plus que vingt, voire même sur plus de trente jours successifs même en dehors de l'été.

L'examen des tendances du nombre de jours pluvieux à l'aide du test de Mann-Kendall montre que, contrairement aux précipitations annuelles, il y'a des tendances significatives claire à la baisse dans les stations de Constantine, Jijel, O.E.B et Tébessa (figure 16). Cela nous laisse penser que les tendances non significatives enregistrées au niveau des précipitations annuelles pour les mêmes stations ne sont pas associées au nombre de jours pluvieux mais plutôt à l'intensité des précipitations. Brunetti *et al.* (2000) ont constaté que la diminution du nombre de jours pluvieux est plus significative que celle des précipitations annuelles en Italie. On peut considérer que le nombre de jours de pluvieux est un facteur qui peut déterminer la qualité d'une année donnée. Le déficit pluviométrique des années sèches dépend de la baisse du nombre de jours pluvieux que de la diminution des volumes précipités par jours pluvieux (Djoufak, 2011).

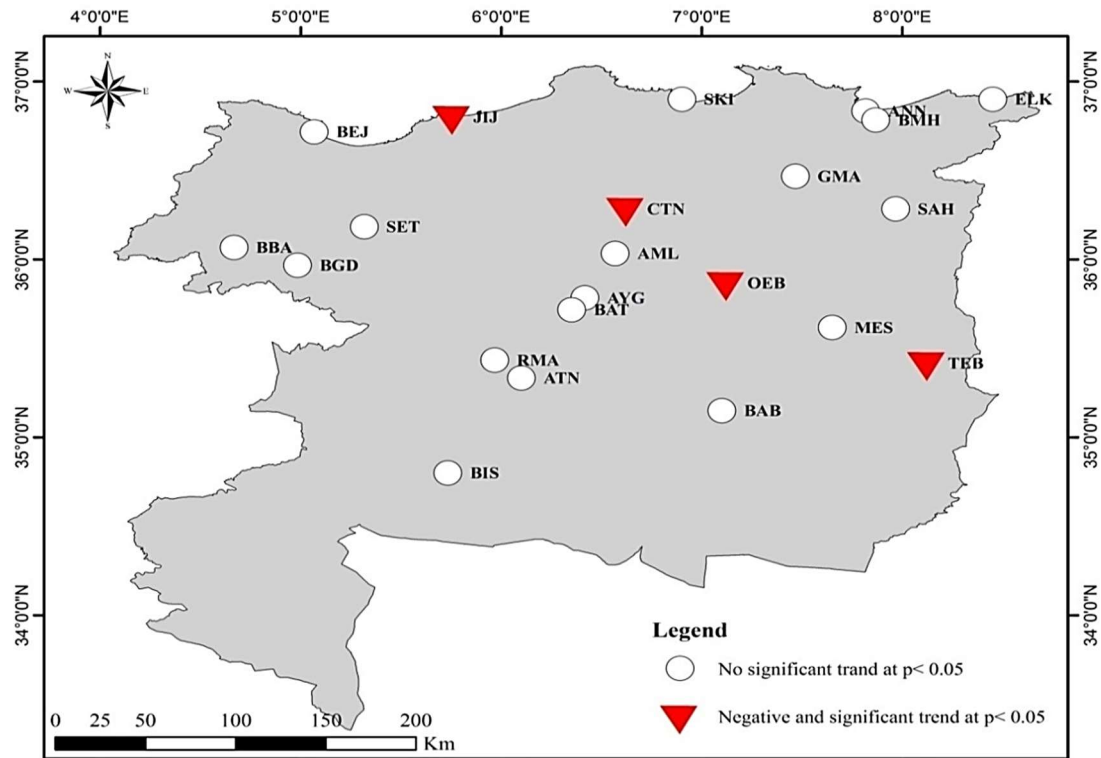


Figure 15: Distribution spatiale des tendances du nombre de jours de pluies au Nord-Est algérien(1978-2010).

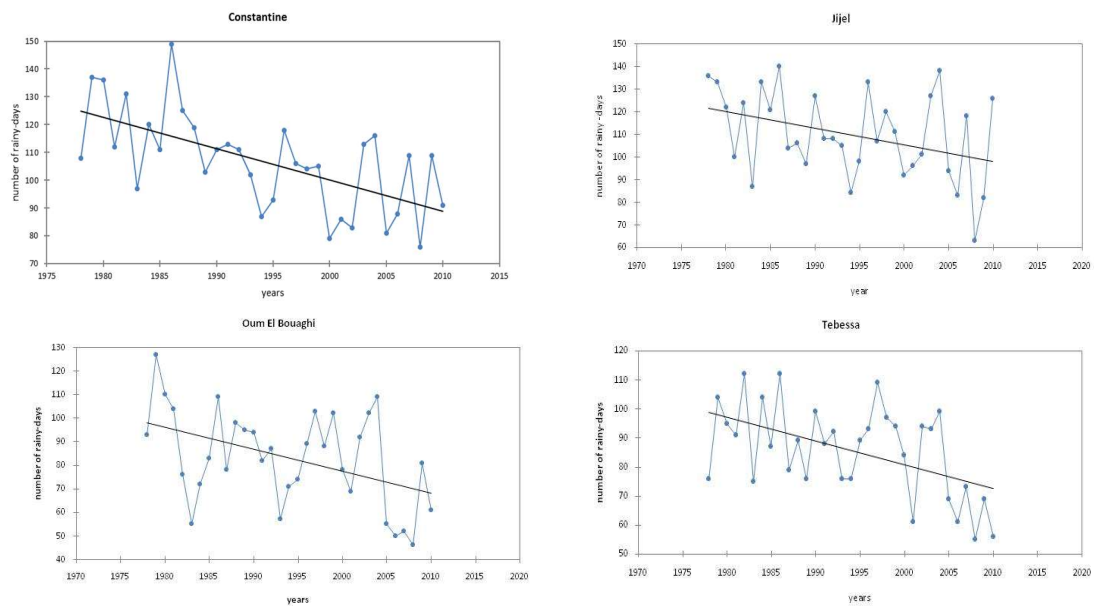


Figure 16: Évolution annuelle du nombre de jours de pluie pour les stations présentant des tendances significatives.

V.2.2.3. Test de corrélation des rangs de Spearman

La tendance linéaire ajustée aux données a également été testée avec le test de corrélation des rangs de Spearman pour vérifier les résultats obtenus par les tests MK. Le tableau 15 montre les coefficients de Spearman (r) calculés pour le nombre de jours de pluie pour les stations étudiées, selon qu'ils expriment une baisse ou une hausse, significative (en gras) ou pas, au niveau de signification $\alpha = 5\%$. Cependant, une tendance à la baisse statistiquement significative (5% de risque) pour le nombre de jour de pluie est observée uniquement dans les stations de Jijel, Constantine, O.E.B, et Tébessa. Les autres stations présentent des tendances à la hausse et à la baisse mais sans signification statistiquement. Les résultats de ce test révèlent aussi que le sens et la signification de tendances observées est similaire à celles obtenues par la méthode de Man Kendall pour toutes les stations étudiées, ce qui confirme les résultats obtenu à partir de ce dernier test.

Tableau 15: Résultats des tests de corrélation du rang de Spearman pour le nombre de jours de pluie par an sur la période de 1978 à 2010.

stations	Rho (r)	p	stations	Rho (r)	p
BBA	-0,29	0.0993	OEB	-0,41	0,015
CTN	-0,58	0.0004	ELK	0,14	0,418
JIJ	-0,35	0,0424	BIS	0,21	0,226
BEJ	-0,30	0,0842	TEB	-0,45	0,0078
SKI	-0,04	0,809	SET	-0,26	0,131
ANN	-0,32	0,066	SAH	0,12	0,476
BAT	0,18	0,31	GMA	0,22	0,207

V.2.2.4. Les moyennes mobiles du nombre de jours de pluie

La variabilité du nombre de jours de pluie a aussi été abordée en ayant recours à la méthode des moyennes mobiles. Cette dernière permet donc suivant les cas d'éliminer les modèles cycliques, saisonniers et irréguliers, et de ne conserver que l'effet de la tendance. Un inconvénient de cette méthode est que les données de début et de fin d'une série sont "perdues" (Spiegel, 1972).

Les courbes d'évolution des séries chronologiques des nombres de jours de pluie par an de la moyenne mobile calculée sur 7 ans, au cours de la période 1978-2010 pour le Nord-Est algérien, nous ont permis de détecter des tendances internes à l'échelle de la région d'étude. La figure 17, montre que les fluctuations contemporaines des nombres de jours de

pluie dans la région d'étude font ressortir une multitude de tendances secondaires dont la durée et l'ampleur sont très variables selon les stations.

L'analyse montre qu'il y'a une même dynamique d'ensemble de la moyenne mobile sur sept ans du nombre de jours de pluie dans la région d'étude. Une tendance à baisse est perceptible à partir de la fin de 1990 dans la majorité des stations étudiées.

Cependant, dans le Nord-Est algérien, on constate qu'il existe trois groupes de stations qui se manifestent avec des phases relativement homogènes :

Groupe 1 : caractérisé par deux périodes, la première tendance avec une période très humide qui prend fin vers les débuts des années 1990 (les valeurs des moyennes mobiles des nombres de jours de pluie qui sont de très loin supérieures à la moyenne) suivie d'une période plus sèche qui débute vers les années 1990 jusqu'à 2010 (les valeurs des moyennes mobiles sont inférieures à la moyenne). C'est le cas des stations de Sétif, Jijel, Bejaia, Annaba, B.B.A, Constantine. Pour les stations de Tébessa et d'O.E.B, la tendance négative commence à partir de l'an 2005.

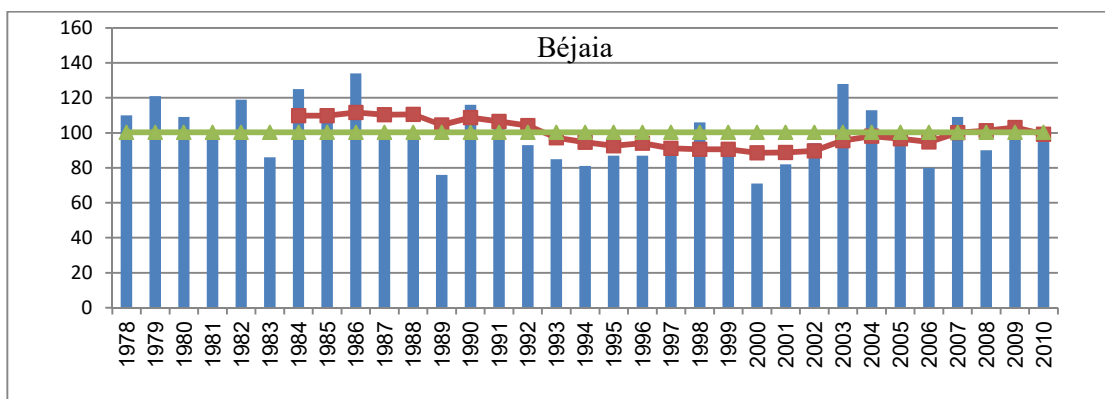
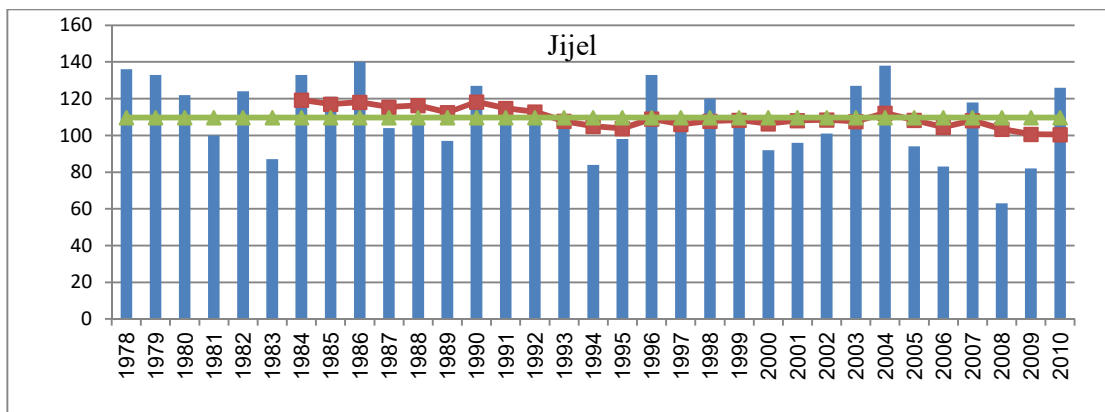
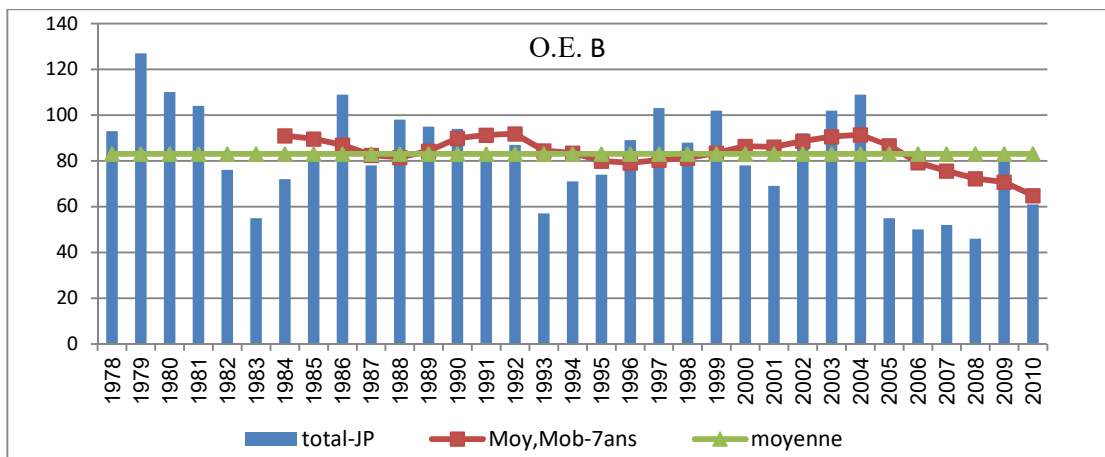
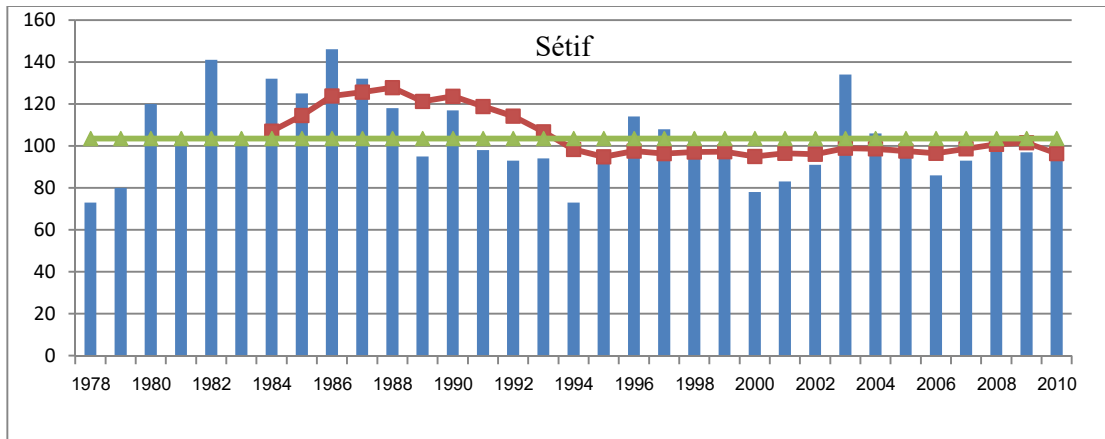
Pour la station de Guelma, on constate une diminution entre 1978 et 1990, puis une remontée du nombre de jours de pluie par an à partir de 1991 jusqu'à 2009.

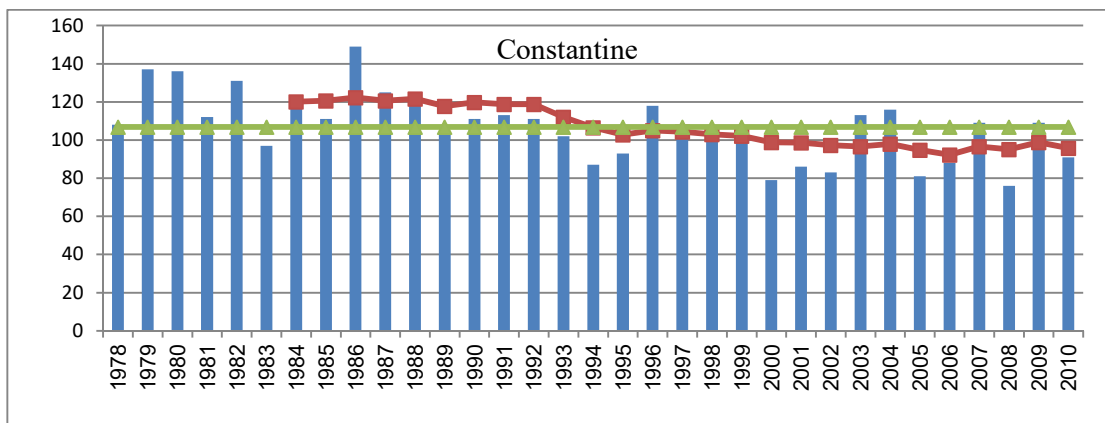
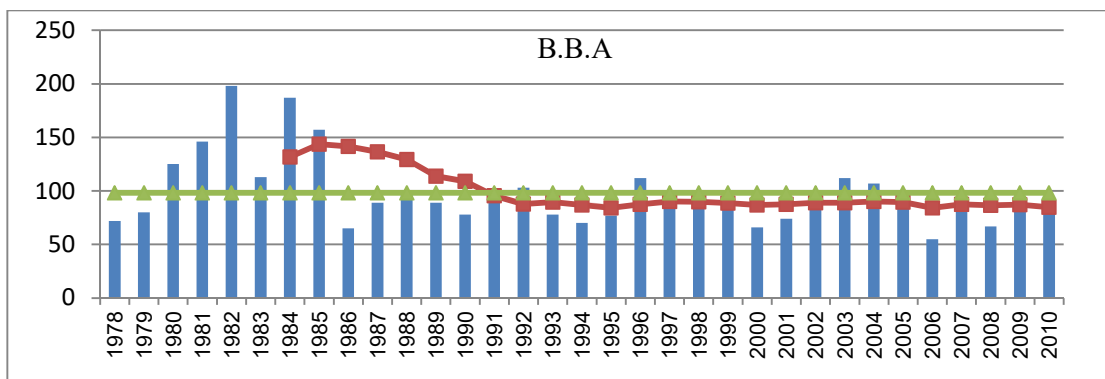
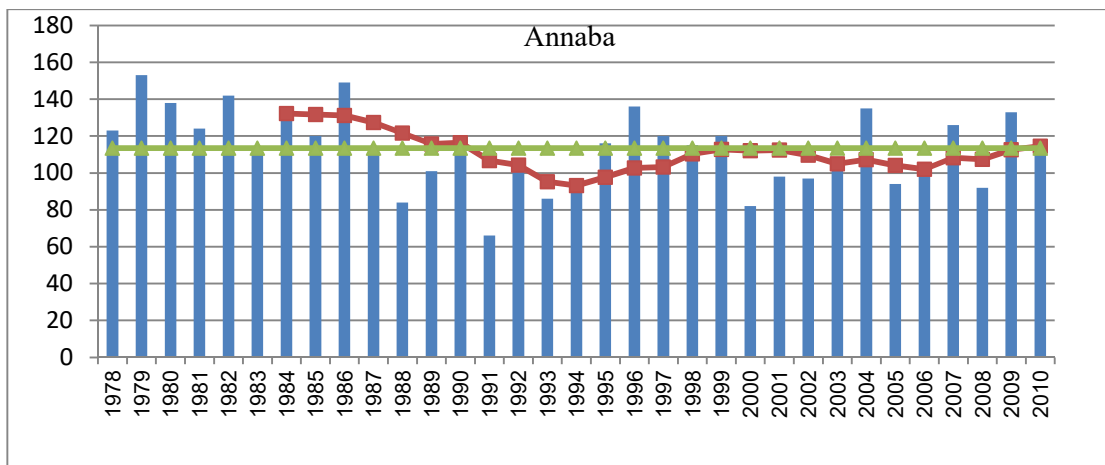
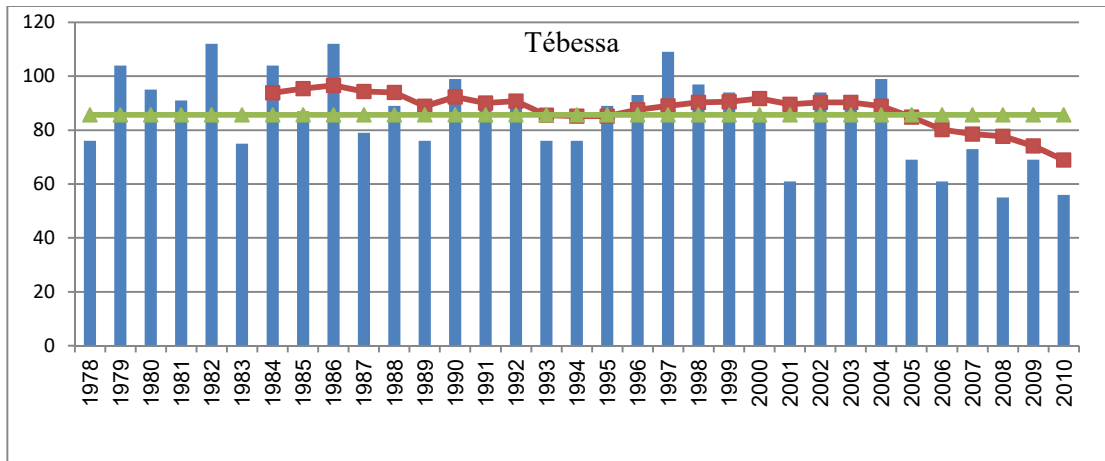
Groupe 2 : ou les fluctuations n'apparaissent plus clairement ; les nombres de jours de pluie sont proches de la moyenne et même supérieurs pour la période d'étude. En effet, les séquences sont le plus souvent inférieures à sept ans. C'est-à-dire une absence de tendance nette, sans configuration spatiale claire, c'est le cas des stations de Batna et El Kalla.

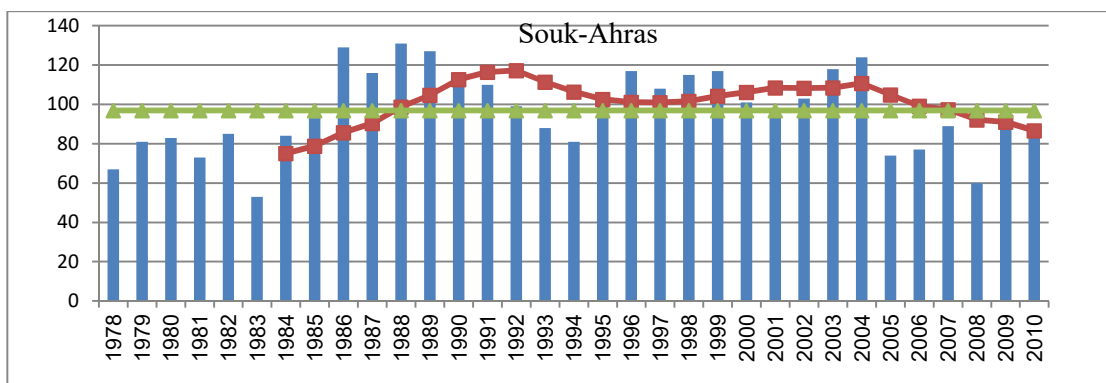
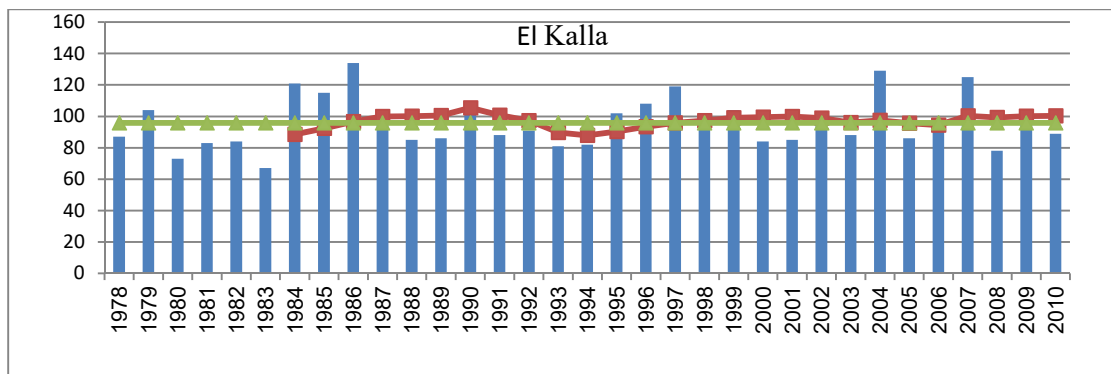
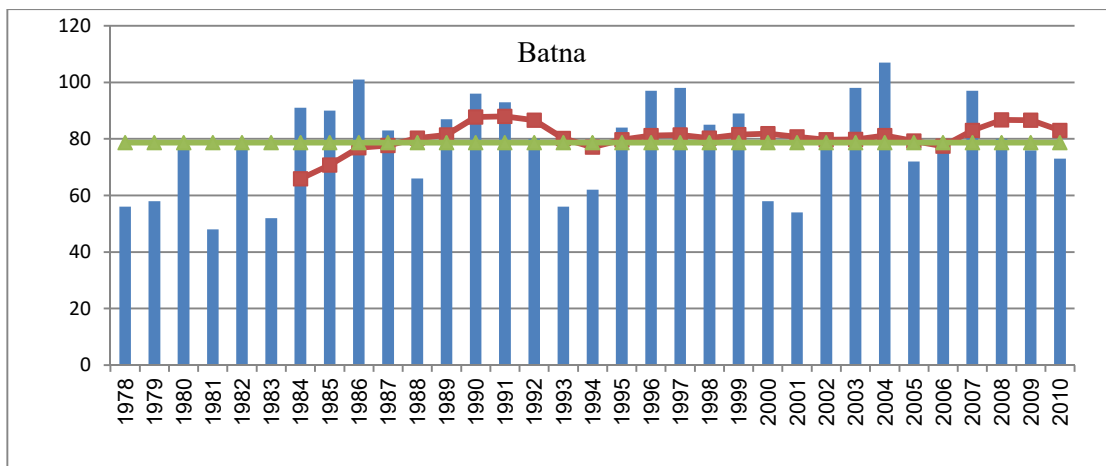
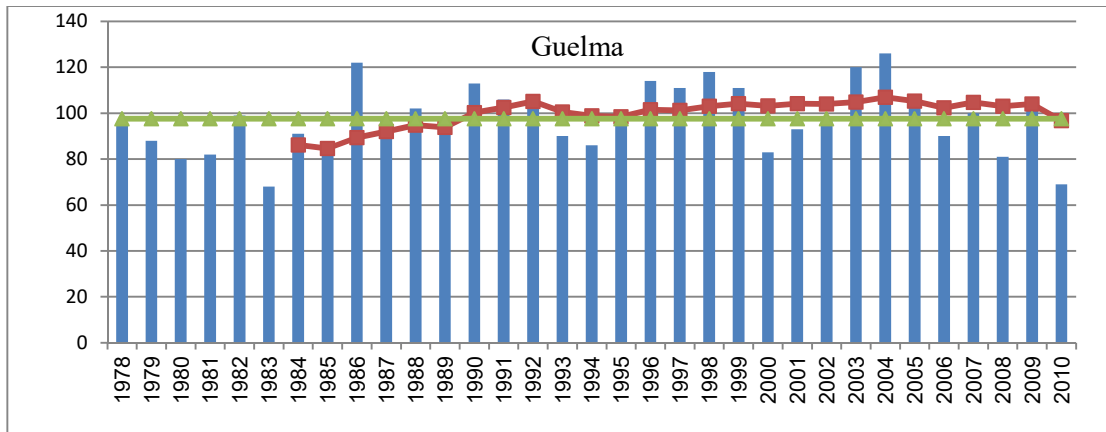
Groupe 3 : caractérisé par trois phases, deux périodes déficitaires séparées par une longue période humide qui s'étale entre 1988 et 2007 dans la station de Souk-Ahras, entre 1990 et 1998, moins marquée pour la station de Biskra. Au niveau de la station de Skikda, la tendance négative débute en 1997 et termine en 2005.

Cependant, le fait que des tendances internes, ont été trouvées dans la région d'étude, nous laisse penser que c'est des changements locaux dans les régimes de précipitations. Ceci semble s'inscrire dans la chronologie des évolutions normales.

Les périodes de baisse sont plus longues et fréquentes que les périodes de hausse. Le poids très fort de la décroissance marquée et continue du nombre de jours de pluie des deux dernières décennies de la série étudiées (Sétif, Jijel, Annaba, B.B.A, Constantine,..), qui malgré ça, n'a pas influencé considérablement la tendance statistique des pluies annuelles produite sur la période considérée (1978/2010).







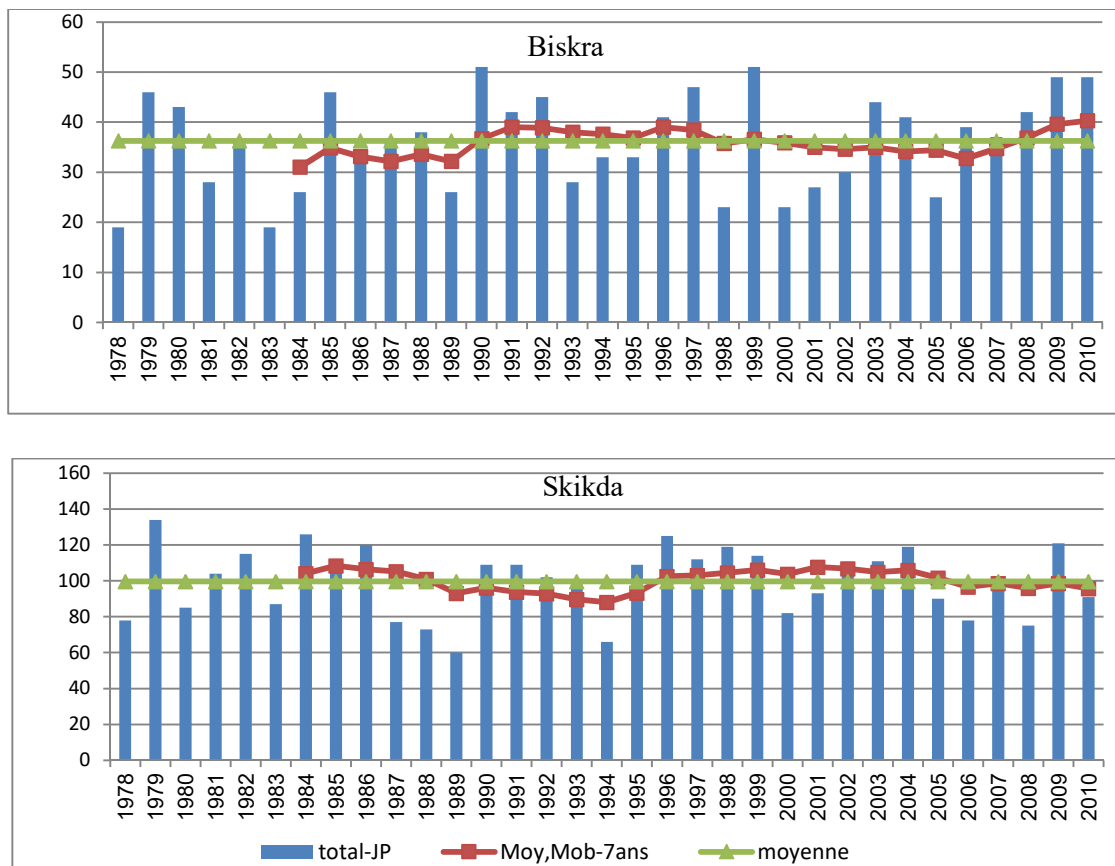


Figure 17: Tendence linéaire du nombre de jours de pluie et moyenne mobile sur 7 ans pour les stations étudiées (1978-2010).

Chapitre VI : Variabilité spatio-temporelle des précipitations mensuelles dans le Nord-Est algérien

L'étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations mensuelles permet de mettre en évidence l'instabilité des précipitations d'un mois sur l'autre au sein d'une même année, même si le total annuel ne varie pas. Cette instabilité pose des problèmes économiques dans une région à vocation agricole ou pastorale, sur l'écoulement des cours d'eau, l'alimentation des nappes phréatiques, etc.

En général, la majorité des études s'accordent que la plupart des précipitations tombent en Algérie entre les mois d'octobre et d'avril. Durant cette période d'importantes variations ont été observées dans la hauteur moyenne mensuelle des chutes de pluie d'une part, et dans la période durant laquelle elles se produisent d'autre part.

Les données des précipitations sous forme de cumuls mensuels proviennent de 22 stations dans la région du Nord-Est algérien. Elles sont réparties de façon homogène.

Afin de mieux cerner la variabilité des précipitations à une échelle plus fine, nous avons effectué une étude à l'échelle mensuelle.

VI.1. Variabilité des précipitations mensuelles dans l'espace

Les valeurs mensuelles de précipitations connaissent une très grande variabilité et des risques de sécheresse apparaissent même durant la saison pluvieuse. Un mois pluvieux d'une année peut être complètement sec l'année suivante. Pour quantifier cette variabilité dans la région d'étude, nous avons utilisé le coefficient de variation exprimé en pourcentage (%), pour les vingt deux stations. Le degré de variabilité est souvent mesuré par le coefficient de variation. Ce coefficient n'est que le rapport de l'écart type d'une série à sa moyenne.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau en Annexe III. Ils nous ont permis d'établir des cartes de la variabilité mensuelle des pluies pour chaque mois pour la période 1978-2010. D'après ces cartes, on constate que les valeurs des coefficients de variation sont, en général, plus élevées si les moyennes des séries mensuelles enregistrées sont petites. Pour Anser (1998), cela signifie que les accidents pluviométriques sont plus fréquents au fur et à mesure que les pluies se raréfient. Ils sont plus rares là où les pluies sont abondantes. En effet, les mois pluvieux présentent des coefficients de variation relativement bas, inversement au mois moins pluvieux qui présentent une variabilité accentuée.

Cependant, La répartition spatiale de la variabilité change sensiblement d'un mois à l'autre et les différences entre les stations sont grandes. Cependant, aucune station n'a un coefficient de variabilité inférieur à 49%. Seuil déjà élevé. Certaines stations dépassent le seuil de 239% pendant les mois d'été. Les coefficients de variation mensuelle oscillent entre 71,1% et 152,3% pour les mois de mars et juillet, respectivement pour la région d'étude. Ce qui indique un régime mensuel irrégulier. Ces coefficients extrêmement élevés, s'expliquent par l'indigence pluviométrique d'une part, et le caractère orageux des précipitations (averses) de la fin d'été d'autre part. Cette irrégularité est plus accrue dans les stations du Sud.

Nous remarquons aussi une certaine organisation de la variabilité mensuelle ; en ce sens que les stations du littoral ont des valeurs faibles, le sud est celui des valeurs fortes (station de Biskra), les hautes plaines constituent un domaine où les coefficients de variabilité sont moyens.

Nous essayons d'étudier la variabilité mensuelle des précipitations à travers l'analyse des douze cartes élaborées.

En janvier, le coefficient de variation est de 77%, la variabilité oscille entre 49 % et 136,8 %, dans les stations de Ben M'hidi et Biskra, respectivement. La plupart des stations littorales et sublittorales sont caractérisées par des coefficients de variations inférieures à 70%. Cas des stations de Jijel (61,4%), Skikda (54,24%), El Kalla (55,22%), Ben Mhidi (49%), et Guelma (64,16%).

Sur les hauts plateaux, les C_v , varient entre 70 et 90 % ; B.B.A (97,75%), Batna (86,61 %), O.E.B (82,56 %), Tébessa (80,54%), Sétif (73,54 %), Ras El Ma (79,24 %), Meskiana (84,6 %). Au Sud, variabilité dépasse 90 %. Cas des stations Ain Tinn (95,01 %) et Biskra (136,18%) (figure 18).

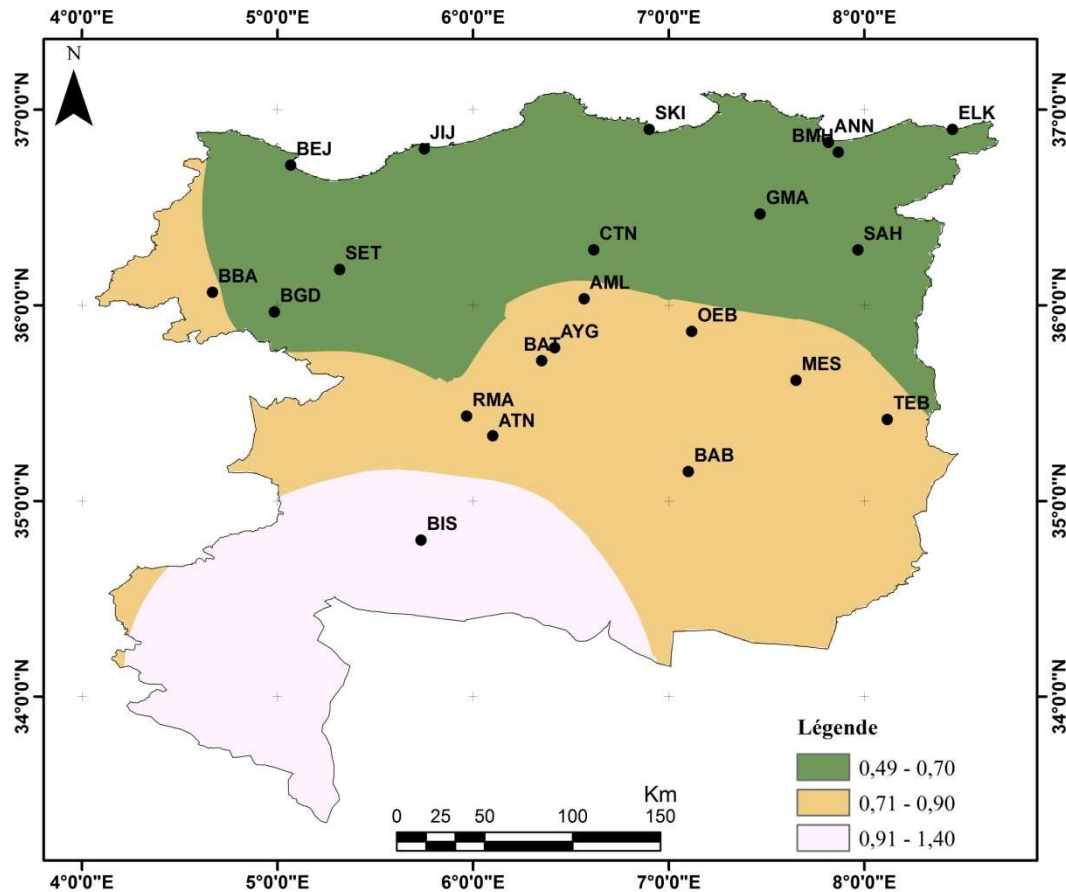


Figure 18: Variabilité mensuelle en janvier (1978-2010)

Pour les mois de février, mars et avril, on constate que ces 03 mois présentent le même scénario que le mois de janvier. La variabilité moyenne est de 76,6 %, 71,1 %, 72,4 %, respectivement. Pour le mois de février la variabilité maximale est enregistrée dans la station de Biskra (129,5%), et le minimum de variation est enregistré dans la station de Skikda (60,4 %) (figure 19). Au mois de mars et d'avril, la station de Biskra présente toujours la variabilité la plus élevée, avec 137,4 % et 145,8 %, respectivement, alors que les stations de Souk Ahras et de Sétif présentent les coefficients de variation les plus faibles 0,54 et 0,53, respectivement durant ces 02 mois. La station de Bordj El Ghedir fait exception, car on enregistre une élévation de la variabilité durant ces 02 mois ou elle dépasse 90 % (figures 20 et 21).

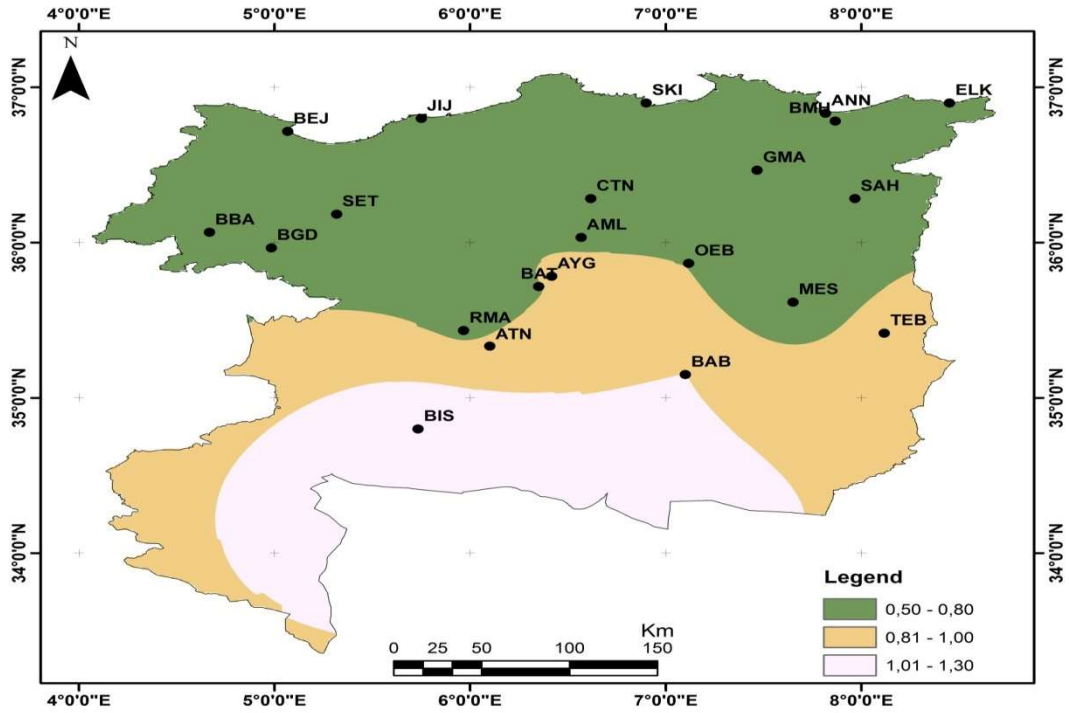


Figure 19: Variabilité mensuelle en février (1978-2010)

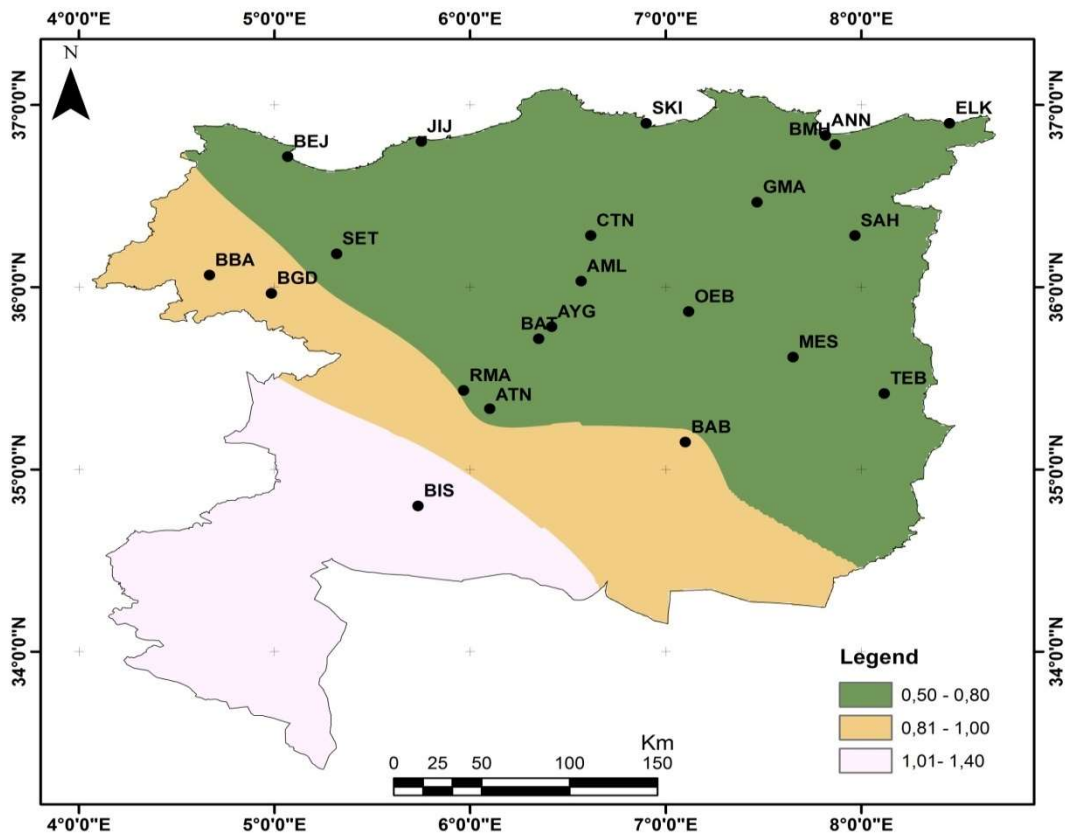


Figure 20: Variabilité mensuelle en mars (1978-2010)

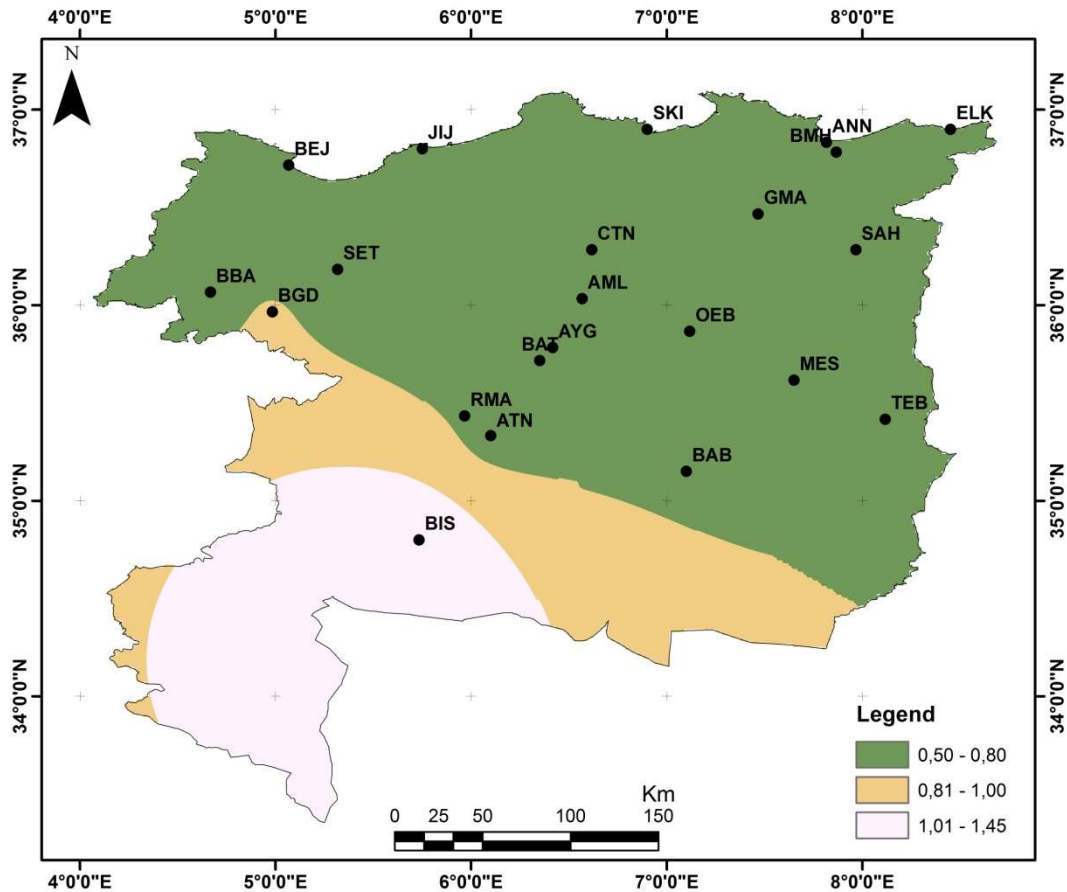


Figure 21: Variabilité mensuelle en avril (1978-2010)

A partir du mois de mai, la variabilité commence à augmenter. Durant ce mois, la moyenne de la région d'étude est de 79,7 %. La valeur la plus élevée est observée dans la station de Biskra (137,6 %), tandis que la plus faible est enregistrée dans la station Meskiana (54,1 %). C'est un mois où la variabilité est intermédiaire entre les fortes et les basses valeurs dans la plus part des stations (figure 22).

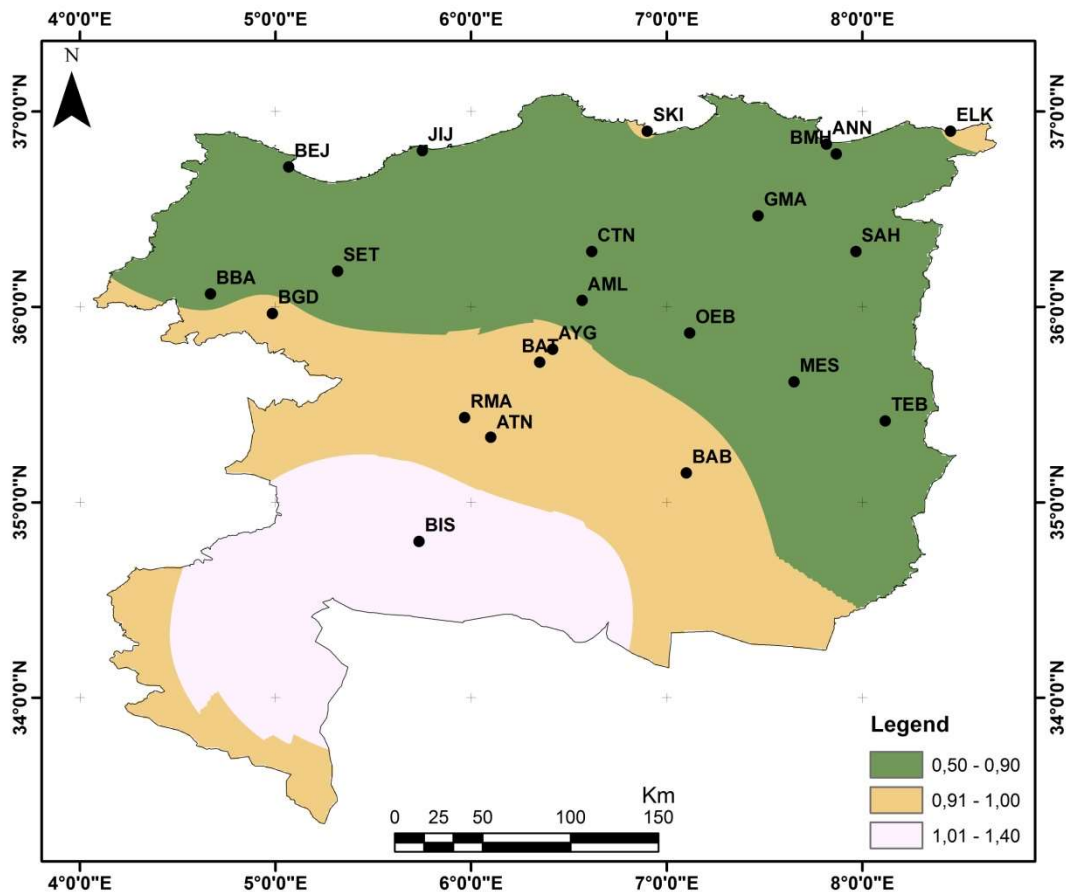


Figure 22: Variabilité mensuelle en mai (1978-2010)

Au mois de juin, la variabilité moyenne de la région d'étude est de 98,7 %. Le minimum est enregistré dans la station de Meskiana (54,4 %) et le maximum observé dans la station de Biskra (113,7 %). Hormis la station de Meskiana, toutes les stations ont une variabilité supérieure à 80 %. Les stations littorales, sub-littorales et celles situées dans les deux Atlas ont des coefficients de variation plus élevés que celles des hauts plateaux (supérieur à 0,90). Cas des stations ; Jijel (118 %), Bejaia (113,4 %), Ben M'hidi (113,6 %), Guelma (118,8 %), El Kalla (126,1 %), Souk-Ahras (95,9 %), Bordj El Ghedir (98,5 %), Ras El Ma (97,8 %) (figure 23).

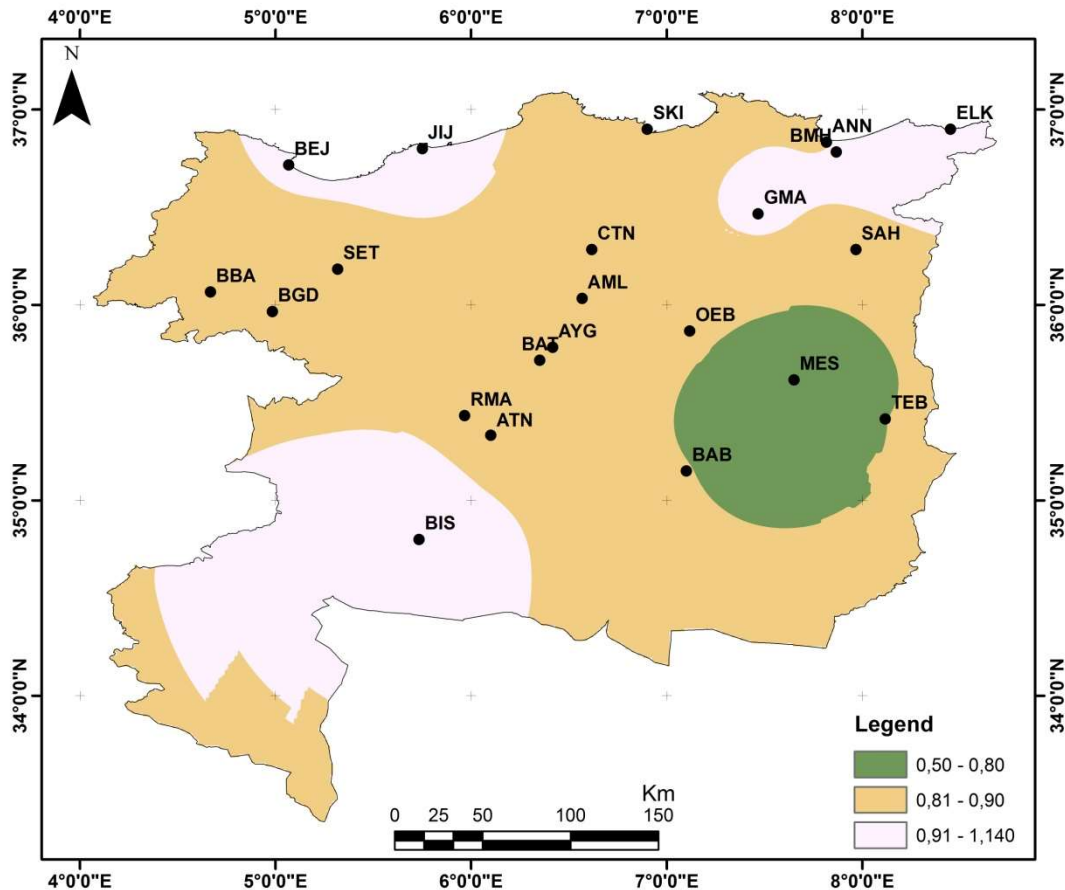


Figure 23: Variabilité mensuelle en juin (1978-2010)

A partir du mois de juillet, les valeurs du coefficient de variation ont atteint des seuils spectaculaires. C'est le mois le plus variable. La variabilité moyenne durant ce mois, dans la zone d'étude est de 152,3 %. Le maximum est de 239,3 % enregistré sur l'Atlas saharien (Ras El Ma), alors que le minimum est observé à la station de Meskiana (74,3%). Cependant, à part cette dernière station, toutes les stations présentent une variabilité supérieure à 110 %. Dans toutes les stations les coefficients de variation ont augmenté. Dans la région littoral et sub-littoral la variabilité a dépassée 120 % ; Ben M'hidi (216,4 %), Skikda (186,3 %), El Kalla (186,7 %), Annaba (148,8 %), Jijel (159 %). Sur les hauts plateaux et les deux Atlas, on trouve le même scénario ; Batna (211,8%), B.B.A (139,8 %), Sétif (120,9%), Ain M'lila (161,1 %), Babar (136,5%), Constantine (127,2 %) (figure 24).

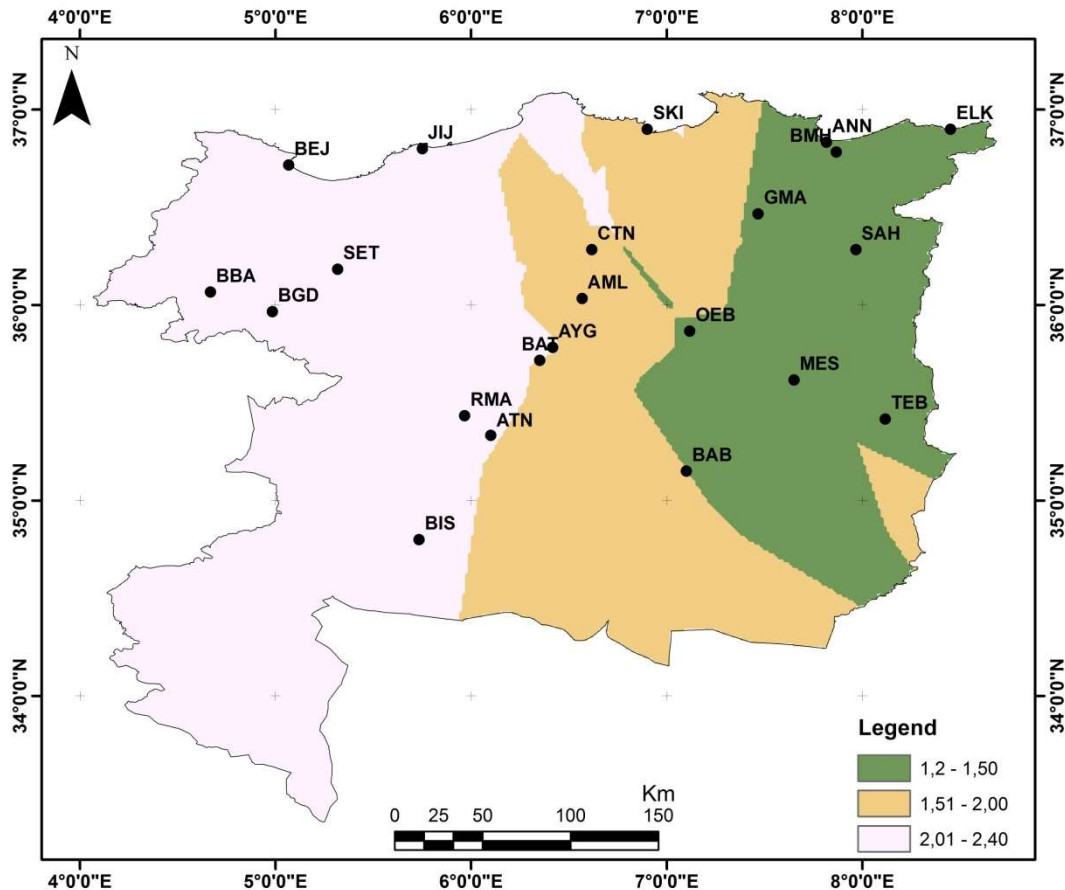


Figure 24: Variabilité mensuelle en juillet (1978-2010)

En aout, La moyenne de la variabilité est de 129 % dans toute la région d'étude. Elle varie entre 238,3 % à El Kalla et 80,9 % à Constantine. Les coefficients de variation restent très élevés, pareil au mois précédent. Néanmoins, on constate que cette variabilité a diminué sur les hauts plateaux, elle est inférieure à 90 % ; B.B.A (86,5 %), Constantine (80,9 %), Sétif (81,8 %), alors qu'au niveau des autres stations, elle est supérieures à 90 % et dépasse même le seuil de 200 %. Cas des stations littorales (Jijel, Bejaia, Skikda, etc), sublittorales (Ben M'hidi), l'Atlas tellien (Souk Ahras et Guelma), l'Atlas saharien et son piedmont sud (Ain Tinn, Batna, Ain Yagout, Babar, Biskra) (figure 25).

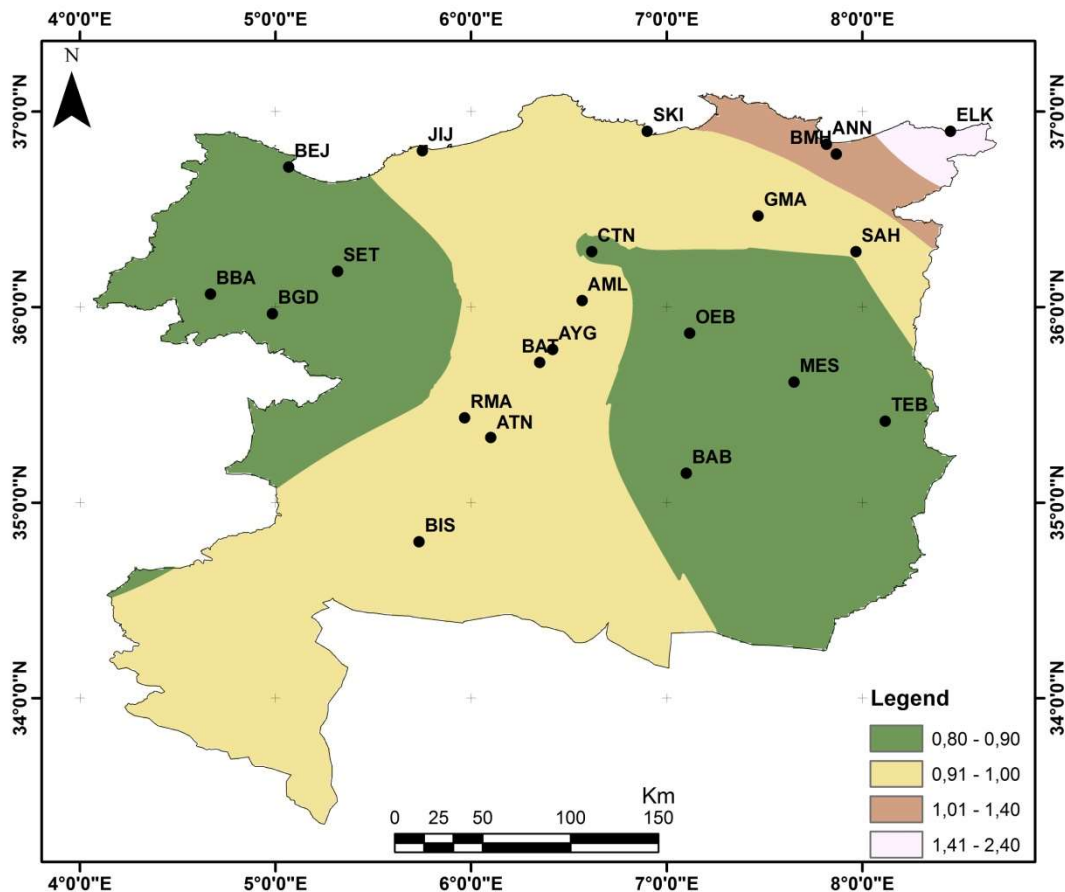


Figure 25: Variabilité mensuelle en aout (1978-2010)

Septembre est le premier mois de la saison des pluies (automne). La variabilité est moindre par rapport aux trois mois précédents. Le coefficient de variation mensuelle est de 77,9 %. La variabilité oscille entre 57,2 % à Batna et 130,5 % à Biskra. Sur le littoral, les coefficients de variation varient entre 70 % et 85 % ; El Kalla (68,5 %), Jijel (79,3 %), Bejaia (83,3 %). Les hauts plateaux sont caractérisés par une variabilité moindre. Elle ne dépasse pas 80% dans la plupart des stations. Cas des stations de Batna (57,2 %), O.E.B (77,7 %), Tébessa (72,2 %), Sétif (71,1 %), B.B.A (73,3 %), Ain Yagout (72,4 %). Les coefficients de variation les plus élevés sont observés dans la région sublittoral (Ben M'hidi ; 88,4 %), dans l'Atlas tellien (Souk Ahras ; 91,4 %) et dans le sud (Biskra ; 130,5 %) (figure 26).

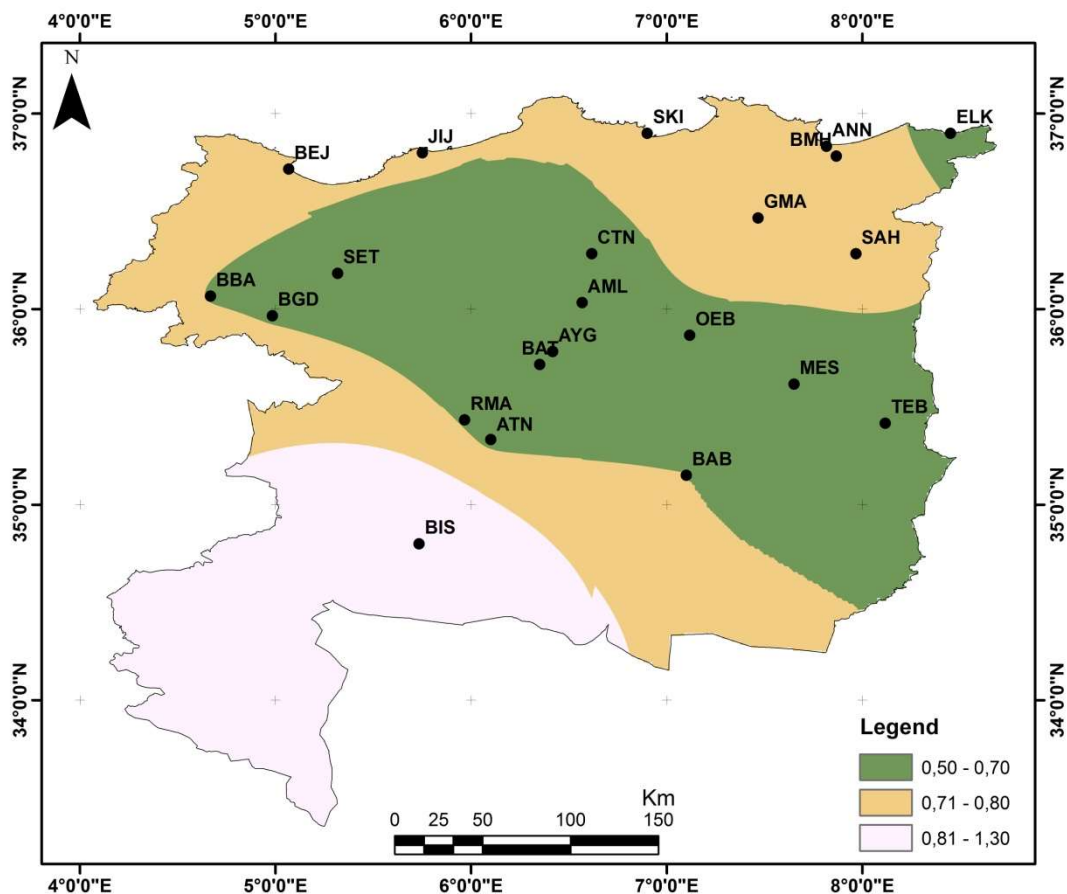


Figure 26: Variabilité mensuelle en septembre (1978-2010)

Le mois d'octobre présente une variabilité mensuelle moyenne de l'ordre de 79,1 %, pour toute la région d'étude. Le coefficient de variation est inférieur à 90 % dans toute les stations de la région d'étude sauf celles du versant Nord de l'Atlas saharien et son pied mont sud. Cas des stations d'Ain Yagout (92,9 %), Ras El Ma (98,2 %) et Biskra (131,1 %). Sur le littoral, la variabilité est en moyenne 80 %, sauf pour la station d'El Kalla (66,7 %). L'Atlas tellien et les hauts plateaux ont des coefficients de variabilité inférieurs à 75 % ; Constantine (67 %), Souk Ahras (67,3 %), Guelma (72,8 %), Sétif (69,2 %), B.B.A (73,1 %), O.E.B (61,8 %) (figure 27).

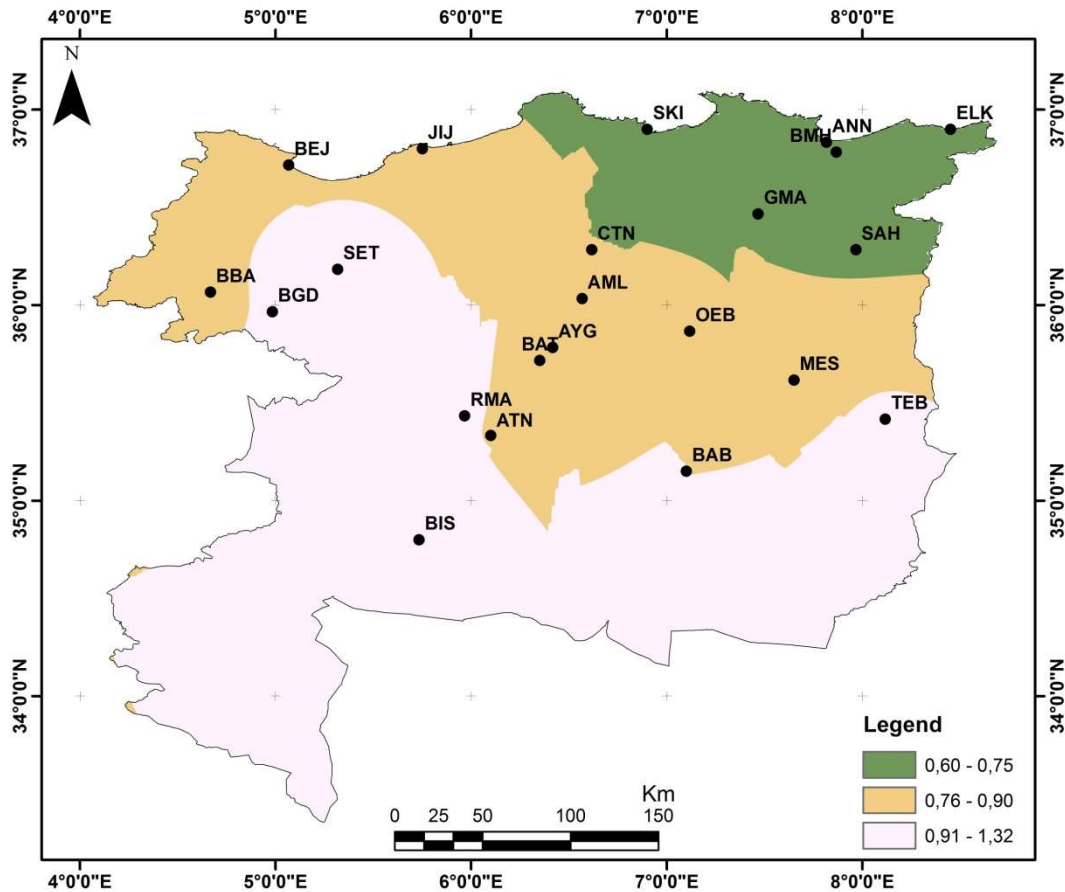


Figure 27: Variabilité mensuelle en octobre (1978-2010)

En Novembre, on constate une nette diminution de la variabilité mensuelle des précipitations. Elle est de 77,1 %. La région littoral et sub-littoral présente des coefficients de variation inférieurs à 65 % ; Jijel (53,9 %), Skikda (64 %), Bejaia (55,9 %), El Kalla (51,8 %), Annaba (60,5 %), et Ben M'hidi (60 %). L'Atlas tellien et les hauts plateaux ont un coefficient de variation qui oscille entre 70 et 100%. Cas des stations de Constantine (75,3 %), Souk Ahras (75,5 %), Guelma (85,2 %), O.E.B (87,8 %), Sétif (71,6 %), Batna (93,6 %), Tébessa (86,6 %), Ain M'lila (96,9 %). Au Sud, la variabilité est supérieure à 100 ; Biskra (114,2 %) (figure 28).

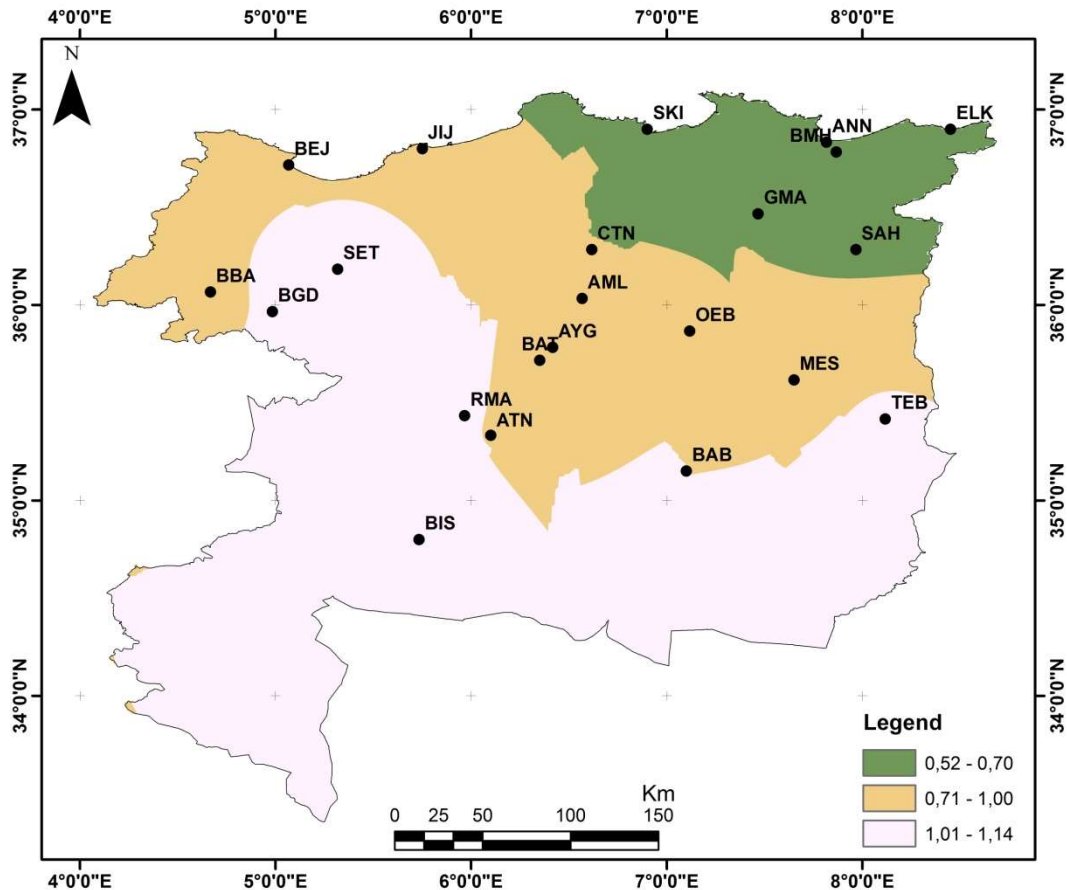


Figure 28: Variabilité mensuelle en novembre (1978-2010)

Au mois de décembre, la variabilité moyenne reste presque constante est similaire à celle du mois précédent. Le coefficient de variation est de 78,1 % pour la région d'étude. La valeur minimale est observée dans la station de Meskiana (55,5 %), tandis que la maximale est enregistrée pour la station de Sétif (153,9 %). Les stations littorales sont les moins variables par rapport aux autres stations (inférieure à 70 %). Les hautes plateaux présente la variabilité la plus élevée ; Sétif (153,9 %), Tébessa (115 %), O.E.B (94,2 %), Ras El Ma (88,6 %), Babar (90,2 %). Les stations de l'Atlas tellien présentent une variabilité intermédiaire ; Guelma (77,4 %), et Constantine (81,4 %) (figure 29).

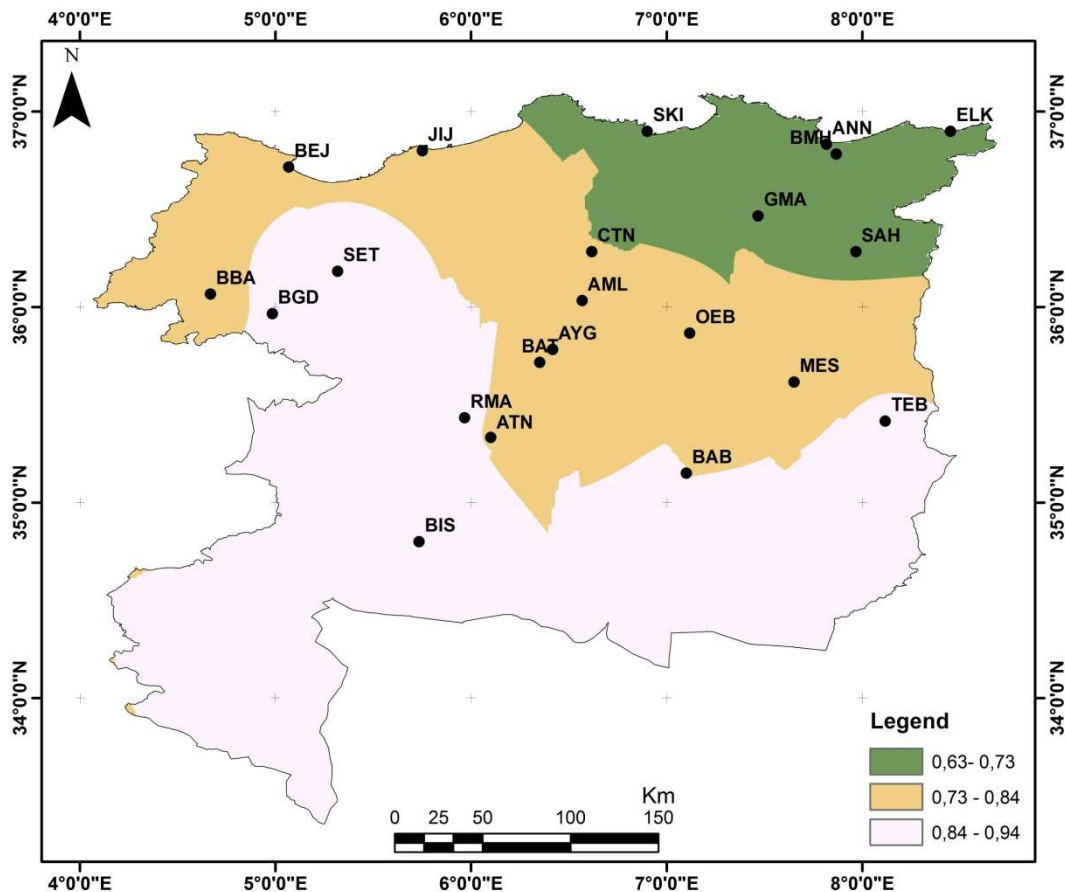


Figure 29: Variabilité mensuelle en décembre (1978-2010)

D'une façon générale, on peut constater d'après cette étude spatiale mensuelle que : La forte variabilité inter mensuelle des précipitations est observée pendant les mois de l'été (juin, juillet et aout). En effet, les valeurs des coefficients de variations avoisinent ou dépassent l'unité (0,99, 1,52 et 1,29) dans la région d'étude. A l'opposé les autres mois enregistrent des valeurs inférieures à l'unité dans la quasi-totalité des stations étudiées (en moyenne 0,77).

La variabilité spatiale des précipitations est relativement plus accentuée dans l'Atlas saharien et de son piedmont sud. Elle est due probablement aux événements climatiques accidentels, des pluies d'orages ou de convection.

La variabilité est à peu près la même pour les stations du littoral, et celles situées sur l'Atlas tellien et les hauts plateaux, qui affichent généralement le même profil.

VI.2. Variabilité temporelle des précipitations mensuelles au Nord-Est algérien

En Algérie, les quelques études se sont concentrées sur l'analyse de la variabilité temporelle des précipitations annuelles et saisonnières dans différentes régions du pays. Toutefois, aucune étude détaillée concernant la variation temporelle des valeurs mensuelles des précipitations couvrant l'ensemble du Nord-Est algérien pendant de longues périodes, et aussi homogènes que possible, n'a été réalisée. C'est pourquoi l'objectif principal de la présente analyse est de contribuer à la connaissance du comportement des précipitations (signe et magnitude) observées au Nord-Est algérien pendant la période 1978-2010 sur une échelle mensuelle. Ensuite, essayer de contribuer à une meilleure interprétation spatio-temporelle des tendances observées.

Par conséquent, nous avons appliqué le test de Mann-Kendall (MK) pour évaluer les tendances statistiquement significatives ($p < 0,05$) dans la série chronologique des précipitations mensuelles pour toutes les stations sélectionnées. L'approche de Sen a été utilisée pour calculer la pente des tendances significatives détectées (Bormann *et al.*, 2011). Notons que les tests statistiques qui permettent de déceler le caractère aléatoire des séries chronologiques des données mensuelles ne sont pas appliqués, car sous l'influence du cycle temporel, les données chronologiques mensuelles présentent des mouvements bien organisés (Sebbar, 2013).

La figure 30 indique le pourcentage de stations présentant des tendances significatives et non significatives ainsi que les tendances positives et négatives pour les précipitations mensuelles à un niveau de confiance de 95 %. Cependant, il y a plus de stations pluviométriques avec des tendances non significatives que celles avec des tendances statistiquement significatives dans les séries chronologiques mensuelles. Les pourcentages des stations avec une tendance significative les plus élevés sont observés durant les mois de juillet et septembre, avec 23 % pour chacun d'eux, alors que pour février, mars et décembre les taux sont 14 %, 9 %, et 5%, respectivement. Le reste des mois ne présente aucune tendance significative pour l'ensemble des stations étudiées. En outre, les tendances à la hausse sont plus nombreuses que celles à la baisse dans les séries des précipitations mensuelles au Nord-Est algérien au cours de la période d'étude 1978-2010. Le pourcentage le plus élevé des tendances élevées est observé au mois de mai (95 %), tandis que le plus faible est enregistré durant le mois de février (5 %).

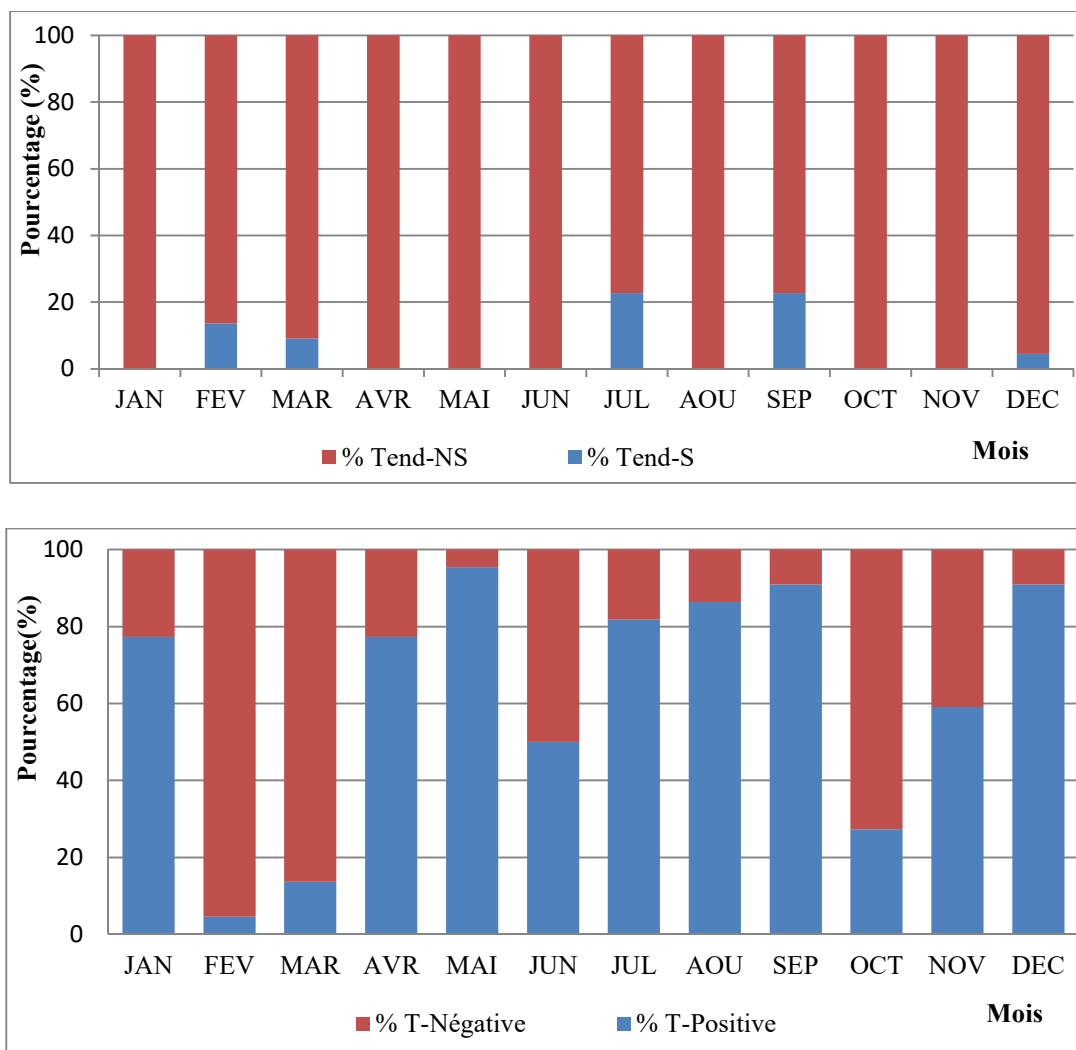


Figure 30: Les pourcentages des significations et les directions des tendances dans les différents mois pour les précipitations moyennes mensuelles.

D'après la figure 31, on constate que certaines mois montrent des tendances positives, tandis que d'autres des tendances négatives. Parmi les 22 stations analysées, on constate qu'uniquement 12 stations qui présentent des tendances significatives au seuil de 95%. Cette signification est observée pour un ou deux mois seulement durant l'année. Le plus grand nombre de tendance positive significative s'observe clairement dans les mois de septembre pour les stations côtières avec une pente de Sen de : Jijel (0,014mm/an), Bejaia (0,027 mm/an), Skikda (0,046 mm/an), Annaba (0,039 mm/an), et Guelma (0,025 mm/an) et de juillet pour les stations se situant dans les hauts plateaux et dans l'atlas Saharien : Batna (0,023 mm/an), Tébessa (0,016 mm/an), Bordj El Ghedir (0,004 mm/an), Ras El Ma (0,027 mm/an).

Les tendances négatives significatives s'observent durant le mois de février pour les stations de Tébessa (0,019 mm/an), Babar (0,042 mm/an), Meskiana (0,0004 mm/an) et

mars pour les stations d'El Kalla (0,022 mm/an), et Meskiana (0,029 mm/an). Ces tendances négatives significatives se localisent surtout à l'extrême Est algérien dans l'Atlas tellien.

La répartition spatiale des tendances au Nord-Est de l'Algérie montre que les tendances positives significatives sont observées durant les mois de septembre pour les stations côtières et juillet pour les stations des hauts plateaux et l'Atlas saharien (Merniz *et al.*, 2019). Mosmann *et al.* (2004) ont constaté qu'il y'a une augmentation significative des précipitations en juillet et septembre dans différentes régions intérieures de l'Espagne, et cette augmentation des pluies a été liée à l'augmentation des processus convectifs résultants du réchauffement de la planète. Pour Chaouche *et al.* (2010), c'est en automne, et notamment en novembre, que les précipitations mensuelles enregistrent une augmentation significative et une baisse en juin pour les régions méditerranéennes françaises.

Les tendances significatives négatives se localisent surtout à l'extrême Est algérien dans l'Atlas tellien (Tébessa – Babar – Meskiana - El Kalla) durant les mois de février et mars. Là, elles sont attribuées peut être à une diminution de la moyenne mensuelle des pluies quotidiennes sauf pour la station de Tébessa où elles le sont à une réduction du nombre de jours de pluie. Cette tendance à la baisse de la pluviométrie est liée peut être à la baisse de la fréquence des perturbations venant du Nord. Selon Taibi *et al.* (2015) les précipitations mensuelles dans les régions montagneuses de l'Est ne semblent pas présenter de corrélations significatives et cohérentes avec les indices de la circulation atmosphérique. Pour Giorgi et Lionello (2008), les diminutions des précipitations sont prononcées en hiver sur les Alpes. Ces résultats sont similaires à celles trouvées au pourtour méditerranéen de la péninsule Ibérique par Gonzalez-Hidalgo *et al.* (2009). Dans le sud de la France, la diminution significative est enregistrées durant des mois différents ; d'octobre, novembre et mars (Norrant et Douguedroit, 2006).

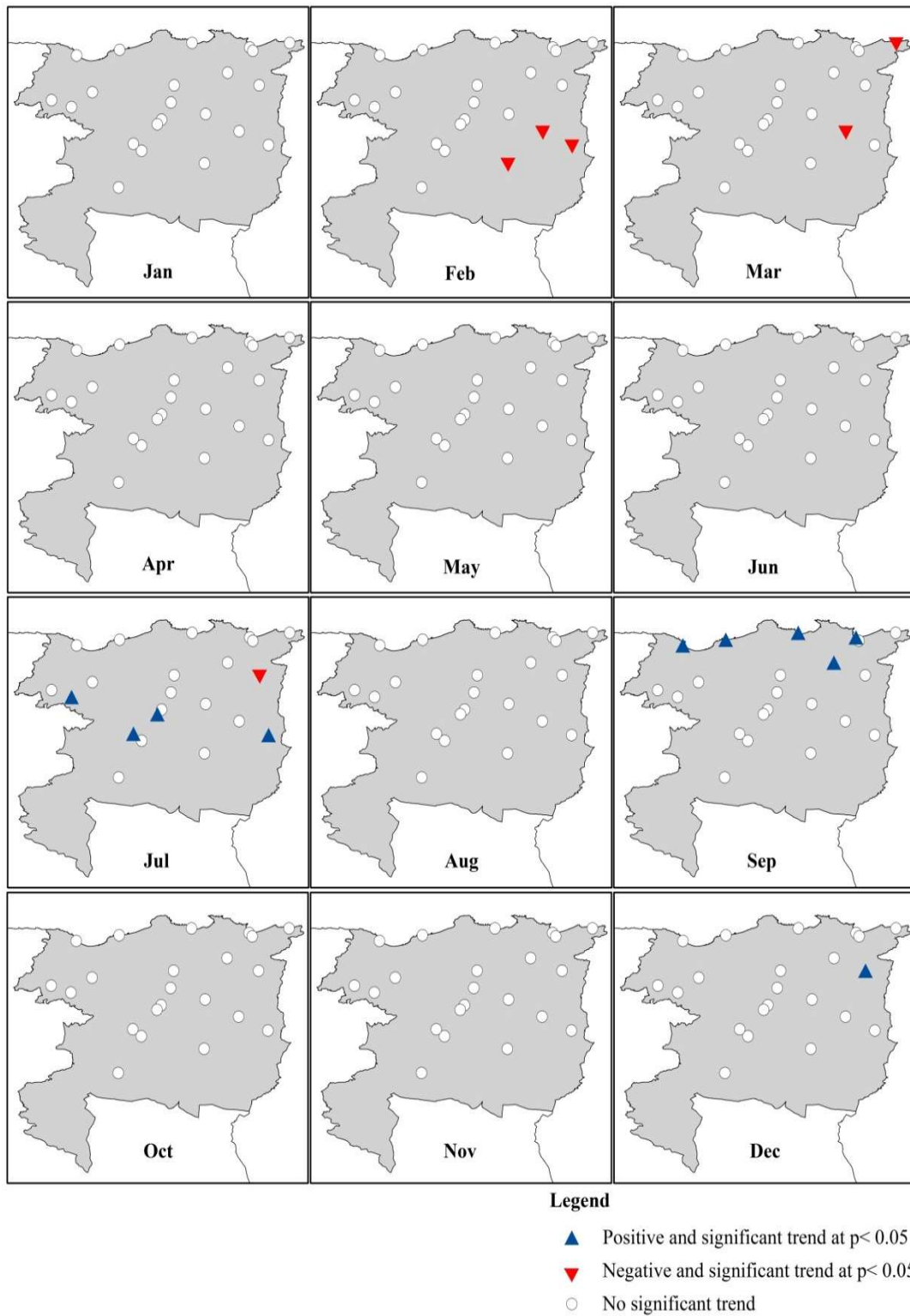


Figure 31: Distribution spatiale tendancielle des précipitations mensuelles ; source : propre élaboration

Chapitre VII : Structures de la variabilité des précipitations : Recherche d'une régionalisation

La connaissance de la répartition temporelle et spatiale des précipitations constitue une étape importante dans le développement des modèles de prévision et la rationalisation de réseaux pluviométrique afin de suggérer des scénarios de gestion de l'eau à l'échelle régionale (Siew-Yan-Yu *et al.*, 1998). Plusieurs méthodes peuvent être mises à profit dans le cadre d'estimation de données hydrologiques à des sites non jaugés ou ayant peu de données, ou encore d'analyse de représentativité spatiale des données ou des sites de mesure. L'hétérogénéité des régions climatiques peut poser problème quand il s'agit d'étudier la distribution spatio-temporelle des précipitations, tant à l'échelle de l'événement qu'à celle de l'année. En climatologie et en hydrologie, les méthodes de régionalisation sont d'un grand intérêt pour la compréhension de la structure de la variabilité des précipitations dans une région donnée. En Algérie, La régionalisation des précipitations a fait l'objet de diverses recherches, en utilisant diverses méthodes (Medjerab et Henia, 2005 ; Meddi *et al.*, 2013 ; Chibane *et al.*, 2015).

Dans le cadre de cette analyse nous essayons de quantifier la variabilité des pluies et d'identifier des régions cohérentes de même variabilité pour déterminer les années très humides et très sèches dans la région du Nord-Est algérien pour la période 1978-2010. Les méthodes présentées dans ce chapitre sont essentiellement utilisées pour décrire la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles.

VII.1. Analyse en Composantes Principale (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est largement utilisée en climatologie pour le traitement des données hétérogènes. Cette méthode permet d'identifier des modes cohérents de la variabilité interannuelle pour les paramètres climatiques (Deyer, 1975 ; Bigot *et al.*, 1995 ; Moran, 1996). Les théories de l'ACP sont abondamment décrites dans la littérature (Hair, 1995 ; Lebart *et al.*, 2000). Nous présentons ici un résumé de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) adaptée aux recherches climatologiques et hydrologiques. (Siew-Yan-Yu *et al.*, 1998)

VII.1.1. Théorie de l'ACP

Considérons n observations faites sur p variables (dans cette étude, n mesures de précipitations annuelles à p stations). Ces observations peuvent être représentées dans un espace à p dimensions, où chaque axe représente la variable. Le but de l'analyse en composantes principales est de transformer ce système à p axes en un autre système ayant deux propriétés importantes. La première est que les nouveaux axes, dits principaux, sont orthogonaux, ce qui implique que les projections des observations initiales sur chacun de ces nouveaux axes, appelés composantes principales, forment des variables qui sont statistiquement indépendantes. La deuxième propriété est que les composantes principales sont rangées en ordre d'importance décroissante, de sorte que chaque composante explique une quantité maximale de la variance des observations laissée inexpliquée par les composantes précédentes.

Pour obtenir les composantes principales, la matrice $p \times p$ de corrélation (R) est utilisée. À partir de celle-ci, les valeurs propres ($\lambda_i, i = 1, \dots, p$) et les vecteurs propres de R (formant la matrice A) sont obtenus. On peut démontrer que Z , la matrice $n \times p$ des composantes principales, est donnée par :

$$Z = X \times A$$

où X est la matrice $n \times p$ des observations normalisées. La relation entre une composante principale et les variables originales peut être mesurée par le coefficient de corrélation entre la variable et la composante. La matrice contenant ces coefficients de corrélation, L , est donnée par :

$$L = A \times D^{1/2}$$

Où D est une matrice diagonale comportant les valeurs propres de R .

Les p valeurs propres de R fournissent une mesure de la variance expliquée par chacune des p composantes principales, et la variance totale du système est égale à la somme des valeurs propres (au sens strict, les variances expliquées sont égales aux valeurs propres de la matrice de covariance et non celles de la matrice de corrélation). La proportion de la variance expliquée par une composante principale Z_i est égale au rapport $\lambda_i / \sum \lambda_i$.

Afin de retenir seulement les composantes principales les plus explicatives de la variance, il est utile de connaître ces rapports. Ainsi, en ne conservant que les m premières composantes principales ($m < p$), le système sera réduit de p à m dimensions avec une perte minimale d'information.

Étant donné que la variance expliquée par la première composante principale est maximisée (p. ex., la somme des carrés des projections des observations sur le premier axe principal est maximale) presque toutes les variables sont fortement corrélées à cette composante. Ainsi, il est souvent difficile d'interpréter la première composante principale autrement que comme un facteur général. Par ailleurs, les autres composantes principales sont généralement bipolaires (corrélées positivement avec certaines variables et négativement avec les autres). Cependant, il est possible, par une rotation des axes principaux, d'obtenir de nouvelles dimensions avec lesquelles quelques variables seulement sont fortement corrélées; un regroupement pourra alors être effectué de façon objective.

VII.1.2. Résultats de l'ACP

Dans le but d'appréhender la variabilité des précipitations annuelles et d'identifier des régions cohérentes de même variabilité afin de déterminer, au sens large du terme, les années très humides et très sèches, une ACP sans et avec rotation Varimax est effectuée sur les stations du Nord-Est algérien. Pour ce faire, il a été pris en compte exclusivement vingt deux (22) stations, qui présentaient les données complètes sur la période 1978-2010. L'analyse en composantes principales est appliquée à un tableau de données afin de dégager le maximum d'information. Ce tableau est constitué d'un certain nombre d'observations (individus), disposés en ligne, sur lesquels sont mesurées des variables, disposées en colonne. Dans le cas de notre étude, les individus seront les trente-trois totaux annuels des précipitations de 1978 à 2010, et les variables les 22 stations climatologiques. L'application numérique de l'analyse en composante principale sans rotation a été effectuée à l'aide du logiciel « Xlstat 2014 ». Les valeurs propres et les vecteurs propres ont été obtenus à partir des matrices de corrélation inter-station et interannuelle.

Dans le cas présent, nous avons conservé cinq composantes principales, qui sont les plus importantes en termes de la proportion de la variance totale expliquée et dont le pourcentage cumulé est supérieur à 80 %, pour le calcul de l'ACP sans rotation à l'échelle interannuelle. Le premier axe explique 52,3 % de la variation totale, le deuxième 11,26 %, le troisième 6,78 %, le quatrième 5,95 %, et le cinquième 3,99 %. Ensemble, ces cinq axes représentent 80,29% de la variance. Mais, nous ne prendrons en compte que les trois premiers axes, qui représente 70,3 % de la variance commune.

En ce qui concerne les deux axes suivants, on peut les négliger, afin de d'éviter des analyses redondantes (figure 32 et tableau 16).

Tableau 16: Variances expliquées pour cinq premières composantes principales

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	11,5061	2,4774	1,4931	1,3094	0,8787
Variabilité (%)	52,3003	11,2610	6,7870	5,9516	3,9942
% cumulé	52,3003	63,5614	70,3483	76,2999	80,2942

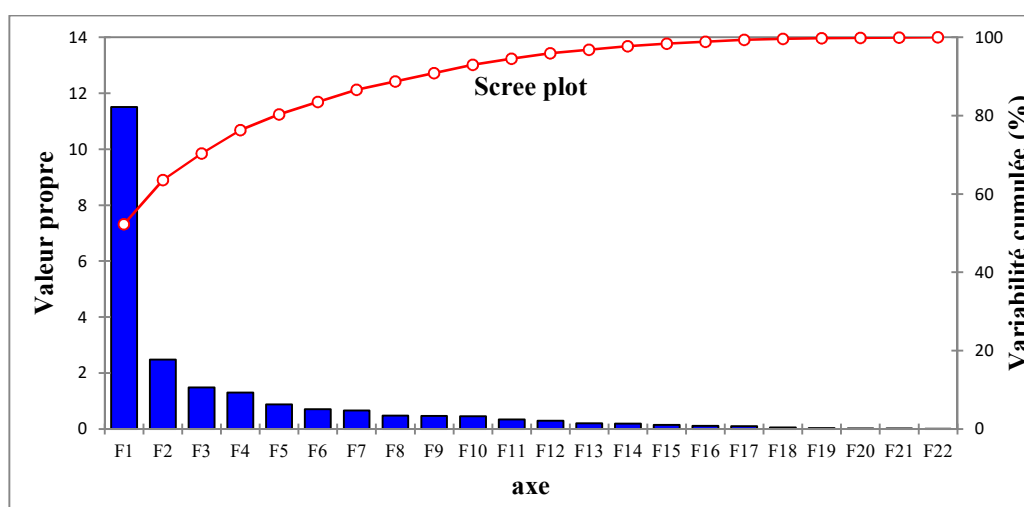


Figure 32: Représentation de la variance expliquée et cumulée des résultats de l'ACP sur la région d'étude.

Cependant la première composante rend compte de 52,3 % de la variance commune. La projection des variables (stations) sur le premier axe a montré que toutes les stations sont positivement corrélées avec ce dernier (figure 33). Les coefficients de corrélation entre les variables et la première composante sont très proches les uns des autres (tous compris entre 0,49 et 0,86). Les valeurs de corrélation sont d'ailleurs toutes significatives au test de Pearson à 95 %, sauf pour la station de Meskiana. Cette cohérence spatiale s'explique par la grande homogénéité des régimes pluviométriques (pluies hivernales et sécheresses estivales) et par un nombre important d'années extrêmes (déficitaires et excédentaires) quasi généralisées (Feki, 2009).

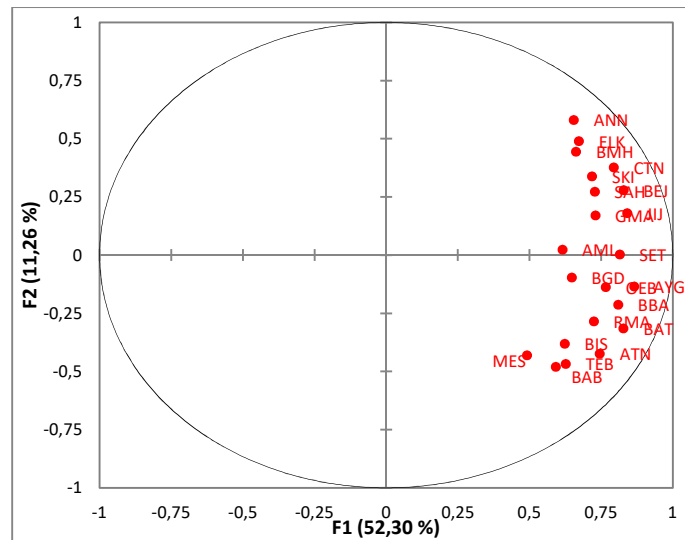


Figure 33: Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F2

La chronique temporelle associée à la première composante représente la grande variabilité interannuelle des précipitations annuelles dans le Nord-Est algérien (figure 34). Elle met en évidence les années extrêmement sèches (-2) : 1978, 1981, 1983, 1988, 1989, 1993, 1994, 2000, et 2001. Toutes les stations ont connu au cours de ces années des déficits pluviométriques par rapport à la moyenne générale. Des années extrêmement humides (> 2) sont également observées : 1982, 1984, 1986, 1992, 1996, 2003, 2004, et 2009. On observe souvent le rapprochement dans le temps de deux années fortement différentes, comme celles formées par le couple 1982-1983, 1992-1993, et 2008-2009. Aux extrêmes, on trouve 2004 pour l'année la plus arrosée et 1983 pour la plus sèche. La succession de plusieurs années fortement caractérisées dans le même sens sont fréquentes pour les années sèches et les années humides.

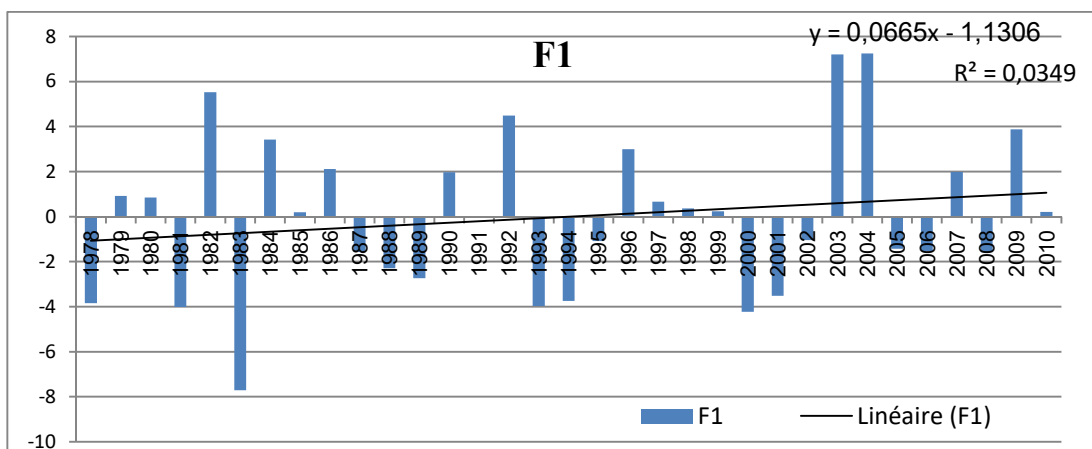


Figure 34: La chronique temporelle associée à la première composante principale.

La seconde composante principale explique 11,26 % de la variance. Les corrélations entre les variables et l'axe 2 varient entre $-0,48$ et $0,58$. Cependant, on constate que les stations se répartissent sur cette composante en fonction de leurs latitudes. Ces résultats ont montré qu'on a deux groupes de stations. Les stations localisées au dessus de la ligne d'isocorrélation zéro, qui affichent des corrélations positives avec l'axe 2. Les hautes valeurs positives concernent les stations les plus au Nord (Annaba et El Kalla ; $0,49$ et $0,6$, respectivement). Par contre, aux valeurs négatives de corrélation correspondent les stations les plus au Sud, qui forment le deuxième groupe. La station de Babar présente la position la plus excentrée (coefficient = $-0,48$) (figure 33). On peut constater, que cette deuxième composante met en évidence un facteur de différenciation régionale essentiel qui est la position latitudinale.

La chronique temporelle associée au deuxième axe, montre que les précipitations annuelles évoluent en alternance de périodes sèches et de périodes humides. Elle est quelque peu opposée au premier axe principal, car on a une tendance à la baisse des précipitations annuelles à partir du milieu des années 1990 (figure 35).

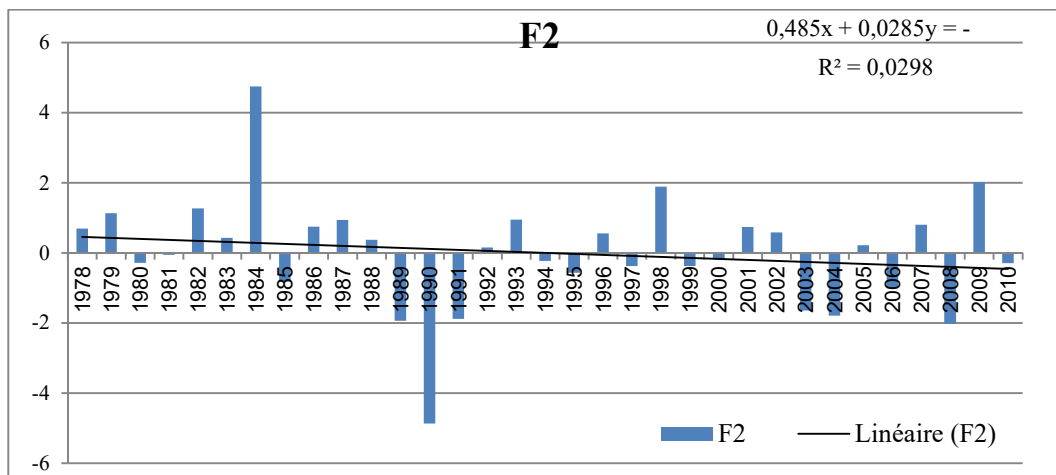


Figure 35: La chronique temporelle associée à la deuxième composante principale.

La troisième composante ne présente que 6,78 % de la variance totale (tableau 16). La station de Meskiana est bien représentée sur cet axe, avec un coefficient de corrélation de $0,6$, tandis que les autres stations forment un nuage de point compact de part et d'autre de l'isocorrélation zéro, et ne présentent aucune structure spatiale bien définie, avec des coefficients de corrélation variant entre $-0,4$ et $0,39$ (figure 36).

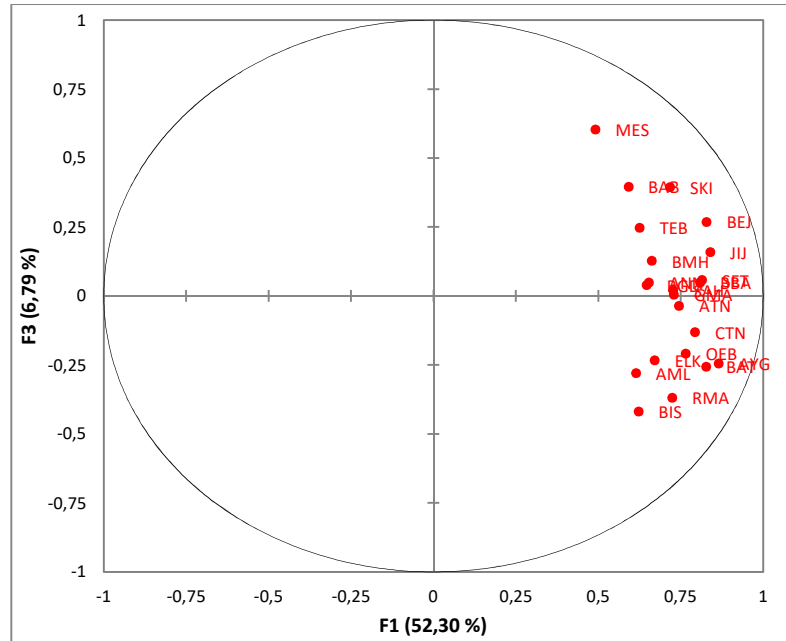


Figure 36: Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F3.

La chronique temporelle associée à cet axe est stationnaire le long de la période d'étude. On constate aussi, que les périodes humides et sèches sont plus étalées par rapport aux précédentes composantes ; 1986-1991 et 1992-2001, respectivement (figure 37).

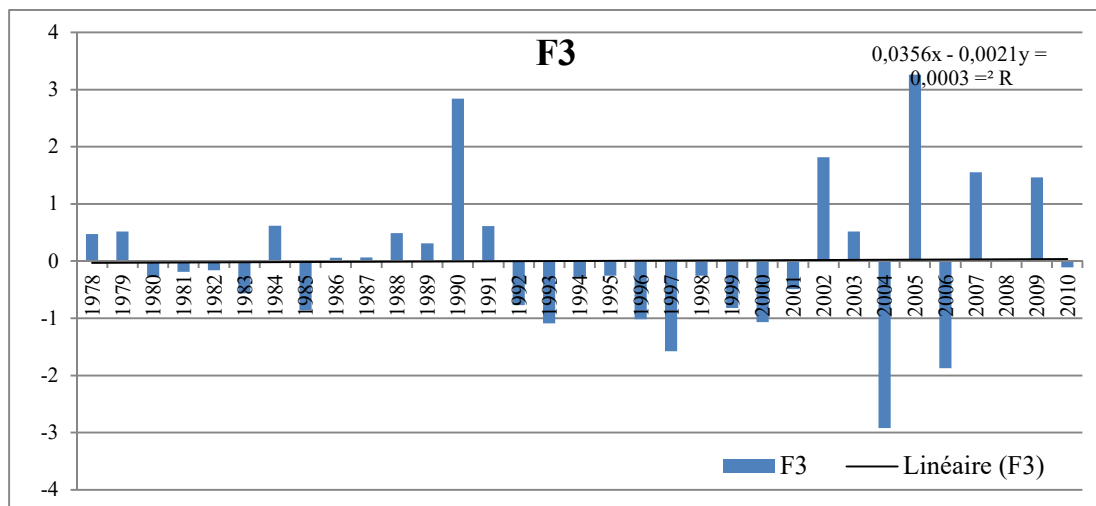


Figure 37: La chronique temporelle associée à la troisième composante principale.

La quatrième et la cinquième composante, qui pèsent 5,9 et 3,9 % de la variance totale, respectivement, sont très peu discriminantes et n'apportent pas d'information supplémentaire.

L'ACP sans rotation a montré que dans tous les cas, la première composante principale est fortement corrélée à chacune des variables initiales suggérant un caractère général des précipitations sur toute la région d'étude. De ce fait, elle ne permet pas de tirer une régionalisation de la variabilité des précipitations de la région d'étude. Cependant, la rotation des axes (en préservant leur orthogonalité) permet de maximiser la variance des corrélations afin de faciliter leur interprétation. Cette rotation ne change en rien la variance expliquée par les axes définis par l'ACP. La rotation a pour effet de répartir cette variance sur l'ensemble des composantes. (Dyer, 1975 ; Richman, 1986)

De ce fait, pour clarifier les structures spatiales de chaque composante, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales avec Rotation (ACPR) de type Varimax, avec la normalisation de Kaiser. Elle a pour particularité de conserver l'orthogonalité entre les facteurs (Richman, 1986).

Les résultats de l'ACPR de type Varimax n'explique pas la variance de la même manière que l'ACP sans rotation. En effet, la variance est répartie sur l'ensemble des axes. Nous avons tenu compte uniquement des cinq premiers axes, qui expliquent 80,29 % de la variance totale (tableau 17). Cette analyse nous a permis de d'identifier des regroupements de stations autour des différentes composantes principales.

Tableau 17: Pourcentage de la variance expliquée après rotation Varimax

	D1	D2	D3	D4	D5
Variabilité (%)	24,30	20,73	12,66	14,28	8,30
% cumulé	24,30	45,04	57,70	71,99	80,29

La première composante explique 24,30 % de la variance totale. Toutes les stations de la région d'étude sont corrélées positivement avec cet axe. Les plus fortes valeurs de corrélation ($> 0,5$) caractérisent les stations littorales (ANN, ELK, SKI, JIJ, BEJ, BMH) et celles de l'Atlas tellien (CTN, SAH), constituant un groupe homogène. Ce dernier est caractérisé par une faible variabilité des précipitations annuelles. Le reste des stations affichent des corrélations inférieures à 0,5 (figure 38).

La composante temporelle associée à ce premier axe montre que le Nord de la région d'étude est caractérisé par une baisse de la tendance des précipitations annuelles pour la période 1978-2010, qui a débuté à partir de l'année 1993. On constate dans cette chronique que l'évolution des précipitations annuelles est l'inverse à celle constatée dans l'ACP sans rotation, et elle présente des déficits et des excédents moins accentués. Le nombre des

périodes secs sont plus nombreuses que celles des épisodes humides, avec 4 et 2, respectivement, (figure 39).

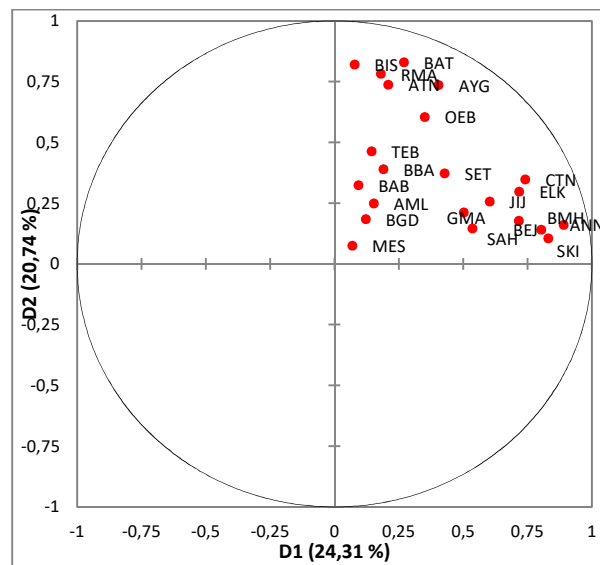


Figure 38: Plan principal des variables de l'ACPR (axes 1 et 2).

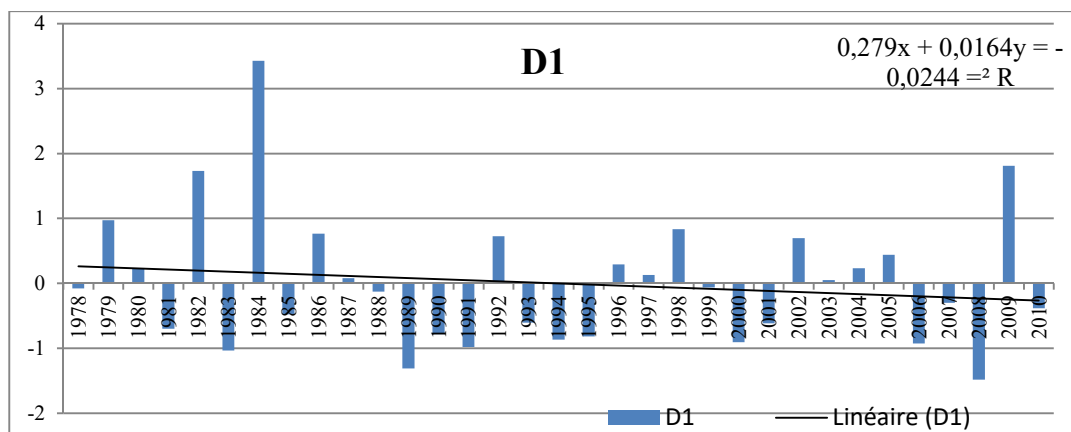


Figure 39: La chronique temporelle associée à la première composante principale.

La deuxième composante représente 20,73 % de la variance expliquée. Les stations les plus corrélées à cette composante sont celles situées sur les hauts plateaux (coté Est de la région d'étude ; BAT, O.E.B, AYG) et celles situées sur l'Atlas saharien et son pied mont sud (RMA, ATN, BIS), avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,7. Le test de Pearson à 95 % est significatif. Ces stations forment un groupe homogène, caractérisé par une grande variabilité annuelle des précipitations. Les autres stations présentent des corrélations faibles variant entre 0,3 et 0,07, et ne présentent aucune signification (figure 38).

La chronique temporelle associée à cet axe montre l'absence d'une tendance des pluies annuelles. Elle est caractérisée par l'absence de longues périodes déficitaires ou excédentaires (2 et 1, respectivement). Les déficits et les excédents sont moins accentués que la précédente chronique (figure 40).

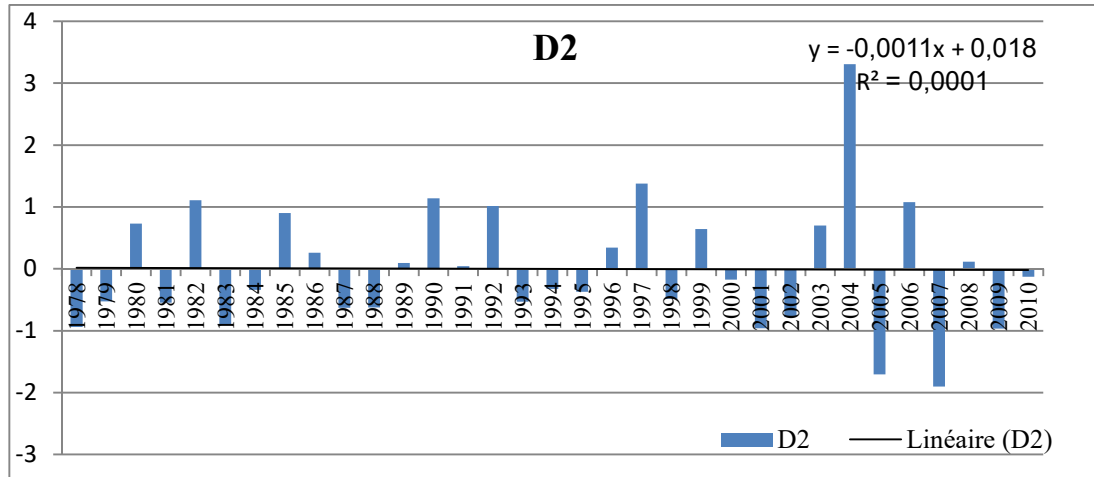


Figure 40: La chronique temporelle associée à la deuxième composante principale.

Quant à la troisième composante, qui explique 12,66 % de la variance totale. Toutes les stations sont corrélées positivement, sauf les stations d'Annaba et d'El Kalla. C'est uniquement les stations de Tébessa, Babar, et Meskiana (extrême Est de l'Atlas saharien) qui présentent une forte corrélation avec cet axe, avec un coefficient de corrélation variant entre 0,71 et 0,86. (Le test de Pearson est significatif à 95 %). Ces stations forment le troisième groupe qui est caractérisé par cette composante (figure 41).

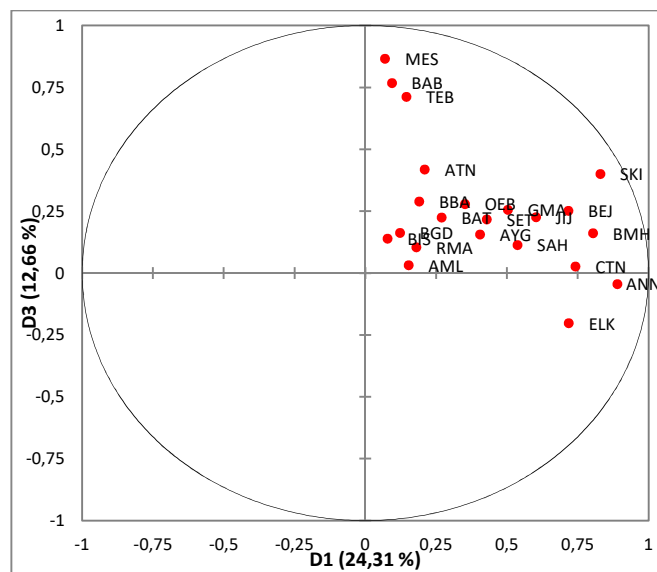


Figure 41: Représentation des variables de l'ACPR (axes 1 et 3).

L'analyse chronique temporelle associée à cet axe (figure 42) présente une tendance à la hausse des précipitations annuelles. Elle met en évidence la présence de deux grandes périodes déficitaires ; 1980-1988 et 1992-2001, intercalée par une courte période excédentaire ; 1989-1991.

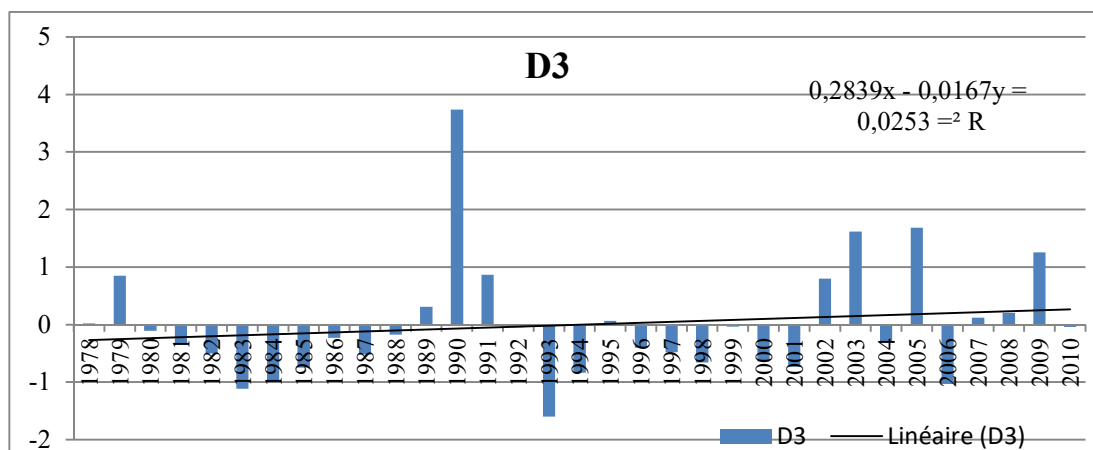


Figure 42: La chronique temporelle associée à la troisième composante principale.

En ce qui concerne la quatrième composante principale, elle rend compte de 14, 28 % de la variance. Toutes les stations présentent une corrélation positive avec cet axe. Cette composante caractérise les stations de B.B.A, SET, et BGD, car elles présentent une corrélation significative, supérieure à 0,6 (figure 43).

La chronique temporelle associée à cette composante montre que les précipitations annuelles présentent une tendance à la hausse. Elle est caractérisée par la présence de longue période humide ; 1984-1996, intercalée par une année déficitaire ; 1990, suivie d'un long épisode sèche qui est observée entre 1997 et 2002. Aux extrêmes, on trouve 2007 pour l'année la plus arrosée et 1979 pour la plus sèche (figure 44).

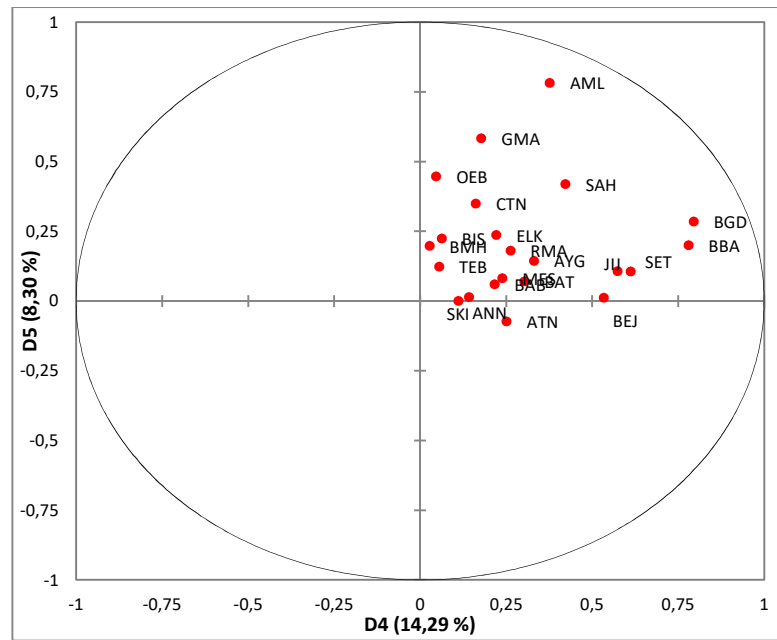


Figure 43: Représentation des variables de l'ACPR (axes 4 et 5)

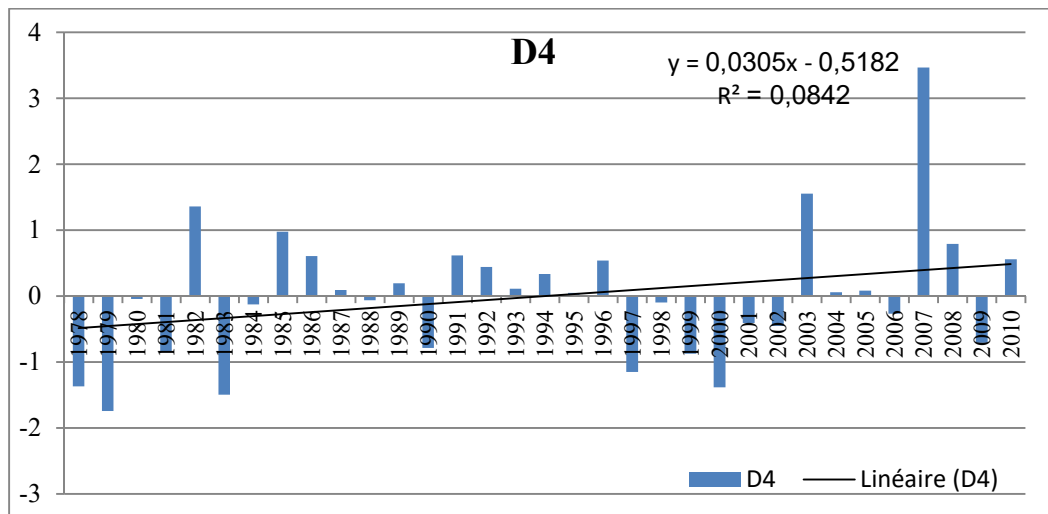


Figure 44: La chronique temporelle associée à la quatrième composante principale

La dernière composante principale retenue pour cette analyse explique 8,30 % de la variabilité totale. Toutes les stations sont corrélées positivement, sauf la station d'Ain Tinn (négative). Uniquement les stations de GMA et AML qui présentent une corrélation significative, avec 0,58 et 0,78, respectivement, formant un groupe que caractérise cette composante (figure 43).

La chronique temporelle associée à cet axe présente une tendance à la hausse des pluies annuelles (figure 45). Elle est différente aux précédentes. Elle décrit une période déficitaire en début de la période jusqu'à la moitié des années 1990, avec années excédentaires

marqués à l'intérieur 1979 et 1992. Le reste de la période est caractérisé par une période humide, avec les années 2002, 2005 qui se distinguent par un excédent pluviométrique marquées.

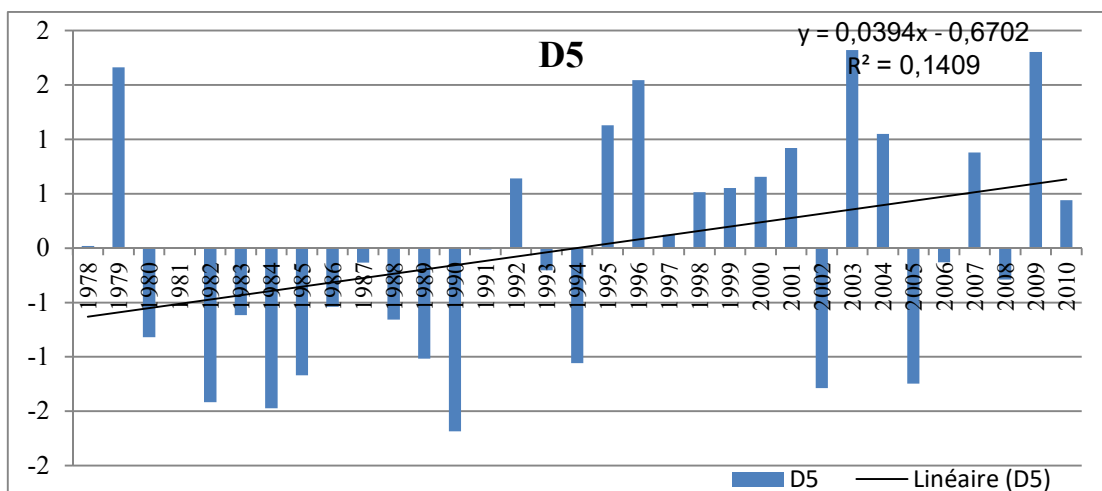


Figure 45: La chronique temporelle associée à la cinquième composante principale.

VII.2. La classification ascendante hiérarchique (CAH)

VII.2.1. Théorie de la CAH

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est un mode de régionalisation, qui consiste à agréger d'abord les individus les plus semblables entre eux, puis les observations ou groupes d'observations un peu moins semblables et ainsi de suite jusqu'au regroupement trivial de l'ensemble de l'échantillon. (Djoufack, 2011)

Cette CAH est une méthode qui cherche à diviser un groupe initial d'individus en plusieurs groupes, afin que les individus d'un même groupe soient à la fois très proches entre eux et très différents de ceux des autres groupes. Elle est dite ascendante, car dans un premier temps, sont créés autant de classes que d'individus, puis dans un second temps, sont regroupés en une unité les deux individus les plus proches, jusqu'à obtention d'un groupe unique. La CAH procède donc par regroupement successifs des unités élémentaires en fonction de leur ressemblance par un ensemble de critères d'agrégation. (Sanders, 1989)

Il existe de nombreux critères d'agrégation entre autres: le "single linkage" (distance minimum) ; le "complete linkage" (distance maximum) ; la moyenne non pondérée des groupes associés; le centroïde non pondéré des groupes associés ; la méthode de Ward. Dans cette analyse, le critère d'estimation qui a été pris en compte est la méthode de Ward, qui se distingue par sa capacité à minimiser la somme des carrés (la variance) de tous les

couples de classes pouvant être formés à chaque étapes, et de ce fait obtenir des groupes de tailles homogènes (Bouroche et Saporta, 1987). En d'autres termes, elle utilise une analyse de la variance approchée pour évaluer les distances entre classes, et se justifie bien lorsque la "distance" entre les individus est le carré de la distance euclidienne. (Djoufack, 2011)

VII.2.2. Arbre hiérarchique (Dendrogramme)

La procédure d'Arbre Hiérarchique (Dendrogramme) est un outil approprié pour montrer les résultats obtenus par une classification ascendante hiérarchique (Mosley, 1981). En coupant l'arbre (dendrogramme) au niveau d'un saut important de l'indice d'agrégation, on peut espérer obtenir une partition de bonne qualité car les individus regroupés en-dessous de la coupure sont proches, alors que ceux regroupés après la coupure sont éloignés.

Nous avons choisi de diviser les stations pluviométriques en classes homogènes en appliquant une classification ascendante hiérarchique (CAH) afin d'établir des regroupements en fonction de la variabilité des précipitations annuelles.

La figure 46, montre le dendrogramme issu de la classification hiérarchique ascendante effectuée à partir des données de précipitation de 22 stations du Nord-Est algérien pour la période 1978-2011. À la vue de cet arbre de classification, qui nous a permis de déterminer le nombre de classes à retenir pour la régionalisation de manière objective, on obtient cinq (05) principales classes. La figure 47 présente, pour chacun des cinq classes pluviométriques, la variabilité interannuelle sur la période 1978-2010. Les moyennes mobiles filtrées sur sept ans décrivent dans l'ensemble une légère variabilité interannuelle. La première classe est constituée des stations ; BBA, BAT, OEB, TEB, SET, BGD, AYG, RMA, AML, BAB, MES. Elle regroupe toutes les stations dont le cumul annuel des précipitations est compris entre 300 et 400 mm et représente la région des hauts plateaux et celle de l'Atlas saharien. La moyenne mobile de cette classe présente une baisse de pluie entre 1984 et 1990, alors que les hausses des pluies se situent entre 2003 et 2010. La courbe des tendances montre que la variabilité interannuelle présente une légère tendance à la hausse. L'année la plus déficitaire est 1983, alors que les plus excédentaires sont 2003 et 2004.

La deuxième classe est formée par les stations se situant entre les plaines littorales (BMH) et l'Atlas tellien (CTN, GMA), ainsi que par la station d'ATN qui se trouve dans l'Atlas saharien sur une altitude de 1640 m. Les précipitations annuelles oscillent entre 500 et 600

mm. La tendance annuelle est stationnaire le long de la période d'étude. On recense quelques années très excédentaires ou le cumul annuel dépasse les 700 mm ; 1982, 1984, 2003 et 2004. Les années très déficitaires sont moindres ; 1983.

La troisième classe est confinée uniquement dans un espace très restreint dans le littoral, formée uniquement par la station de Jijel. Les précipitations annuelles fluctuent entre 800 et 1000 mm. La moyenne glissante sur sept ans montre qu'il existe une longue période déficitaire entre 1988 et 2001, suivie d'une période excédentaire jusqu'à 2010. On enregistre une légère tendance à la hausse pour la période d'étude. Les années les plus excédentaires (les pluies avoisinent 1200 mm par an) sont : 1982, 2003, 2004, 2007, tandis que la plus déficitaire est 1983.

Pour la quatrième classe, elle est constituée par les stations littorales (BEJ, SKI, ANN, ELK) et de la station de SAH (située dans l'Atlas tellien en extrême Est). Cette classe présente des précipitations annuelles comprises entre 600 et 800 mm. La moyenne mobile montre l'existence de 03 périodes ; la première est excédentaire (1984-1988), suivie d'un long épisode déficitaire entre 1993 et 2002, puis une reprise pluviométrique à partir de 2004 jusqu'à la fin d'étude. La courbe des tendances montre que la tendance est stationnaire le long de la période d'étude. Les années très humides sont ; 1984 et 2009, tandis que les plus sèches 1983 et 2000.

Enfin, la dernière classe, se situe au piedmont sud de l'Atlas saharien (Biskra). Les précipitations annuelles oscillent entre 100 et 150 mm, et présentant une tendance très légère pour la période d'étude. En effet, la moyenne mobile montre une légère baisse des pluies entre 1984 et 1993, suivie d'une autre excédentaire allant de 1994 jusqu'à 1999. L'année la plus déficitaire est 2002 alors que la plus excédentaire est 2004.

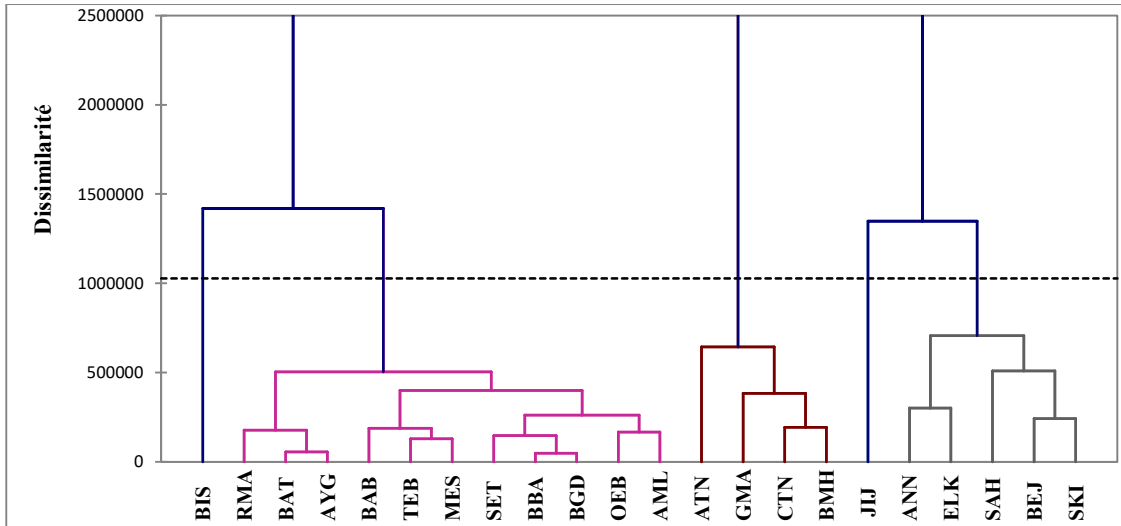
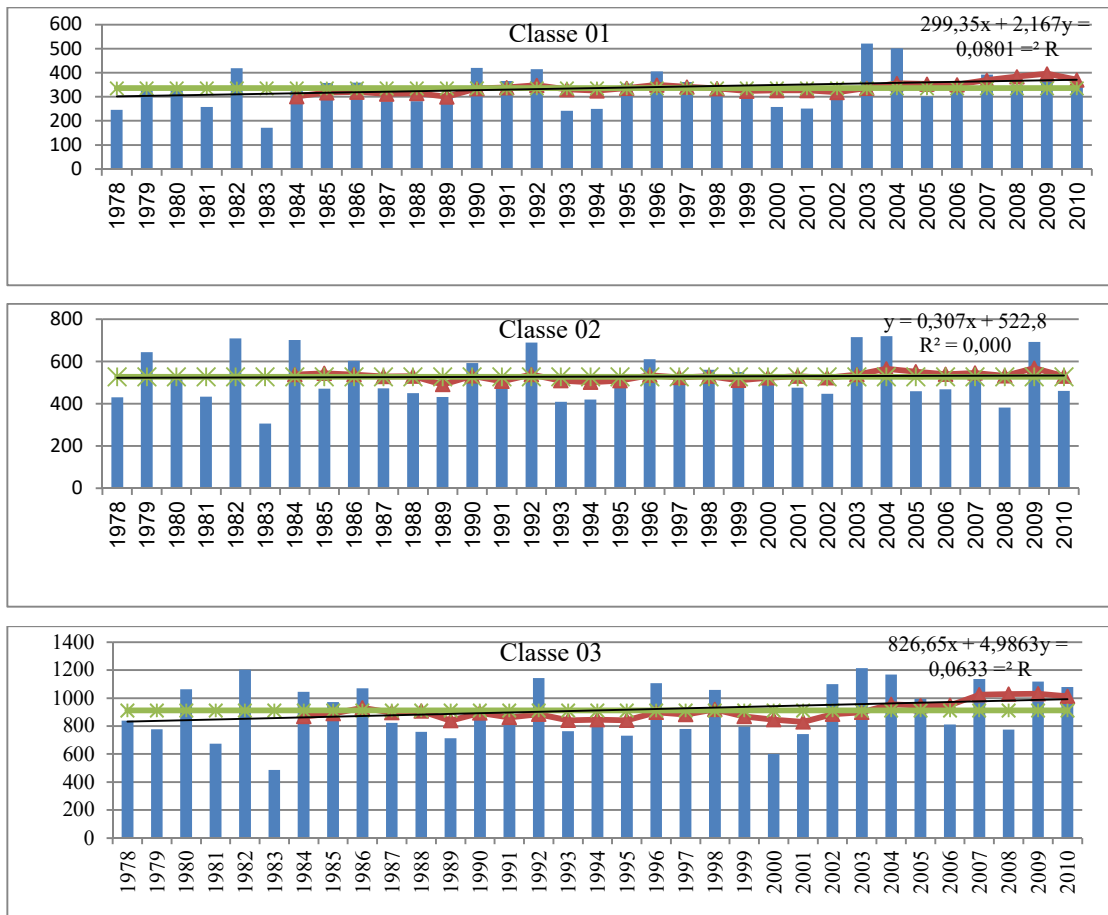


Figure 46: Classification hiérarchique ascendante (CHA) des stations pluviométriques du Nord-Est algérien (1978-2010).



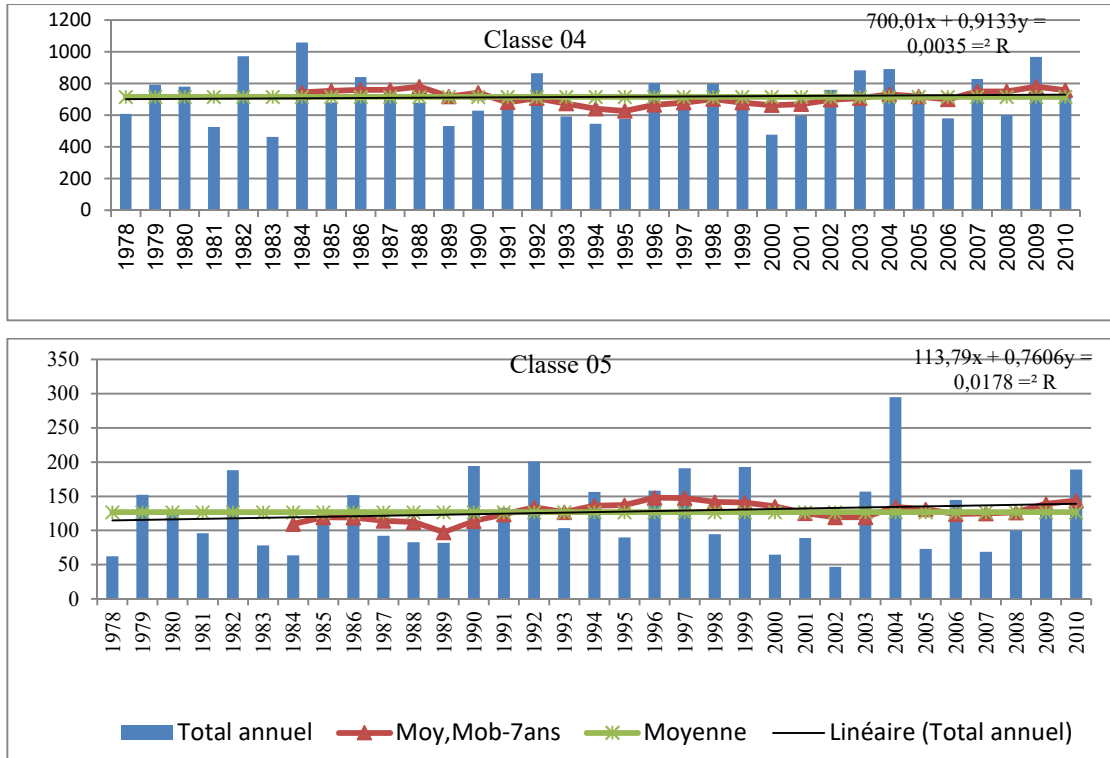


Figure 47: Profil des classes résultant de l'CHA en fonction des précipitations annuelles du Nord-Est algérien (1978-2010).

Conclusion et perspectives

La compréhension de la variabilité des précipitations peuvent être appliquées à divers domaines sociaux et économiques afin de soutenir la prise de décisions relatives aux ressources en eau, à la protection de l'environnement, à la production agricole, à la planification énergétique, au tourisme, et aux activités commerciales.

Les recherches sur les pluies au Nord-Est algérien sont peu, et lorsqu'elles sont disponibles elles se basent sur des études à petite échelle plus ou moins détaillée. Comme point de départ, pour aider à la prise de décision sur la disponibilité des ressources en eau, le besoin croissant de connaître le comportement et les tendances des précipitations, justifie le présent travail dans cette région.

Le Nord-Est algérien, région de contraste en matière de variabilité des pluies, qui est plus fragilisée du point de vue environnemental (pression anthropique, surpâturage, désertification, déforestation, etc.), subit de fortes variations des précipitations et de ses ressources en eau.

Le présent travail a pour but d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des précipitations dans le Nord-Est algérien et d'analyser la structure de cette variabilité (recherche d'une régionalisation), en analysant les données des précipitations annuelles, mensuelles et le nombre de jours de pluie par an, collectées dans 22 stations pour la période 1978-2010.

Une synthèse bibliographique a permis d'apprécier l'état des connaissances dans le domaine du changement climatique et d'évolution des régimes pluviométriques, et de ses implications sur les ressources en eau, en méditerranée et en Afrique du Nord d'une manière générale, et en Algérie en particulier.

La première étape de ce travail a été consacrée à la critique des données. Différents tests d'homogénéité ont été utilisés pour critiquer les données pluviométriques (doubles cumuls, test de Pettitt, test du rapport de Von Neumann), ce qui a permis d'améliorer la qualité de la base de données, car ces méthodes ont montré que toutes les séries annuelles des stations sont homogènes. De même l'autocorrélation a montré l'absence de cycles

temporels dans les séries chronologiques des précipitations annuelles et du nombre de jours pluvieux.

Pour analyser la variation spatiotemporelle des précipitations, on a utilisé différentes méthodes statistiques, entre autre, le coefficient de variation et les tests de tendance et de rupture, alors que pour d'identifier des régions cohérentes de même variabilité afin de déterminer, au sens large du terme, les années très humides et très sèches, une ACP sans et avec rotation Varimax et une classification ascendante hiérarchique (CAH), sont effectuées sur les stations du Nord-Est algérien.

A l'échelle annuelle, la valeur moyenne du coefficient de variation pour la zone d'étude est de 27%. Il apparaît que la variabilité interannuelle est très prononcée dans toutes les stations étudiées, et que d'une manière générale, on remarque que les valeurs de la variabilité annuelle augmentent du Nord au Sud d'une manière très claire, et cela montre que l'irrégularité pluviométrique est d'autant plus importante que le climat est plus aride. Sur le plan temporel, les tendances pour 33 années de la période d'étude sont assez claires. En effet, pour les pluies annuelles, aucune station n'a une tendance statistiquement significative.

Différents tests appliqués à la détection d'une rupture dans les séries annuelles ont montré des résultats différents. Les tests de Pettitt et Buishand soulignent l'inexistence d'une rupture significative pour les vingt deux stations étudiées. Ces observations confirment l'évolution de la tendance des précipitations annuelles analysée par le test de Mann-Kendall.

Pour le nombre de jours pluvieux par an, la moyenne annuelle est de 93,28 pour le Nord-Est algérien. Le nombre de jours de pluie varie entre 113,51 dans le Nord (Annaba) et 36,27 dans l'extrême sud de la zone d'étude (Biskra). Sur le plan temporel, les tendances du nombre de jours pluvieux à l'aide du test de Mann-Kendall ont montré qu'il y'a des tendances significatives claire à la baisse dans les stations de Constantine, Jijel, O.E.B et Tébessa, montrant une configuration spatiale cohérente malgré le nombre réduit des stations considérées. Les tendances à la baisse et à l'augmentation enregistrées dans les autres stations ne sont pas statistiquement significatives.

L'analyse des fluctuations contemporaines des nombres de jours de pluie dans la région d'étude montre qu'il y'a une même dynamique d'ensemble de la moyenne mobile sur sept

ans du nombre de jours de pluie dans la région d'étude. Une tendance à baisse est perceptible à partir de la fin de 1990 dans la majorité des stations étudiées.

On peut considérer que le nombre de jours de pluvieux est un facteur qui peut déterminer la qualité d'une année donnée. Le déficit pluviométrique des années sèches dépend de la baisse du nombre de jours pluvieux que de la diminution des volumes précipités par jours pluvieux.

En ce qui concerne les précipitations mensuelles, la répartition spatiale de la variabilité change sensiblement d'un mois à l'autre et les différences entre les stations sont grandes. Aucune station n'a un coefficient de variabilité inférieur à 49%. Seuil déjà élevé. Les coefficients de variation mensuelle oscillent entre 71,1% et 152,3% pour les mois de mars et juillet, respectivement pour la région d'étude. Ce qui indique un régime mensuel irrégulier. Ces coefficients extrêmement élevés, s'expliquent par l'indigence pluviométrique d'une part, et le caractère orageux des précipitations (averses) de la fin d'été d'autre part. Cette irrégularité est plus accrue dans les stations du Sud.

L'analyse la variabilité temporelle des précipitations mensuelles a révélé que la tendance positive significative est observée durant les mois de septembre dans les stations littorales et juillet pour les stations des hauts plateaux et le sud de l'Atlas saharien, tandis que les tendances significatives négatives s'observent durant les mois de février et mars dans les stations de l'extrême Est de la région d'étude.

Enfin, Nous avons procédé à une régionalisation des stations du Nord-Est algérien, pour la période 1978-2010, en fonction de la variabilité interannuelle par deux méthodes différentes; l'Analyse des composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique ascendante (CAH). Nous avons calculé les tendances linaires des pluies annuelles de chaque groupe obtenu.

L'ACP avec rotation (ACPR) types Varimax a permis d'identifier cinq groupes de stations bien distincts pour la période 1978-2010 ; le littoral et l'Atlas tellien, les hauts plateaux (coté Est) et l'Atlas saharien, extrême Est de l'Atlas saharien, hauts plateaux (partie Ouest), et enfin un groupe individualisé par les stations : GMA et AML.

L'analyse des chroniques temporelles de ces groupes a fait montré qu'une diminution non significative des précipitations domine uniquement la région littorale et l'Atlas tellien à partir des années 1990, alors qu'au niveau des autres régions les tendances sont stationnaire ou avec une légère hausse des tendances, non significative, à partir des années

1990. L'ACPR a permis également de déterminer les années extrêmes (déficitaires et excédentaires) par le biais des indices standardisés des précipitations annuelles.

La méthode de classification ascendante hiérarchique a été également utilisée, conduisant à identifier cinq (05) classes distinctes ; les hauts plateaux et l'Atlas saharien, les plaines littorales et l'Atlas tellien, extrême Nord (Jijel), la région littorale, le piedmont sud de l'Atlas saharien. L'étude de la stationnarité des séries de classes révèle des tendances linéaires stationnaires dans toutes les classes, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par l'analyse des tendances avec le test Mann-Kendall.

La répartition spatio-temporelle des précipitations annuelles au Nord-Est algérien est influencée par la circulation atmosphérique, la latitude, la longitude, la proximité de la mer méditerranéenne, la topographie, et la disposition des versants.

Ces résultats indiquaient que pour la période analysée, il n'y avait pas une variabilité importante des précipitations dans le Nord-Est algérien, mais plutôt on assiste à un décalage saisonnier, d'où l'intérêt de cette étude, qui pourrait avoir un impact négatif sur les cultures céréalières et les parcours steppiques dans les hauts plateaux, et aussi sur l'étagement de végétation dans les deux Atlas.

Par conséquent, les résultats susmentionnés seront utiles aux gestionnaires, aux planificateurs, aux agriculteurs, et aux hydrologues pour élaborer des plans d'irrigation et de gestion des eaux ainsi que pour la prévention du risque d'inondation et de la prédiction de la sécheresse dans le Nord-Est algérien.

Cette étude constitue une contribution à l'analyse de la variabilité spatiotemporelle des précipitations dans le Nord-Est algérien. Elle apporte un certain nombre d'éléments de base pour une meilleure connaissance du régime pluviométrique dans cette région, elle permettra d'avancer vers la conservation et l'utilisation efficace de cette ressource nationale et de mettre au point des stratégies de gestion de l'eau pour le pays. Cette étude sur la variabilité des précipitations ouvre plusieurs perspectives :

- Extension de la zone d'étude : les analyses menées dans cette étude n'ont concerné que le Nord-Est de l'Algérie. Il importe d'étendre ce travail à tout le pays pour pouvoir tirer des conclusions générales. La contrainte qui se pose tout de suite est la disponibilité des données ;

- Des études sur la prévision des régimes hydroclimatiques à partir de l'évolution de la circulation atmosphérique de grande échelle aideront à renforcer nos connaissances sur l'évolution du climat futur ;
- Des études futures seraient intéressantes pour comparer les résultats constatées dans notre étude avec les résultats d'autres tests pour détecter les tendances ;
- Il est également recommandé d'examiner d'autres variables climatiques disponibles au Nord-Est du pays.

Références bibliographiques

- Abdessemed K. (1981). Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) dans les massifs de l'Aurès et du Bélezma : Etude phytosociologique, problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doctorat. Univ. Aix-Marseille. France.
- Adewi E., Badameli K. & Dubreuil V. (2010). Évolution des saisons des pluies potentiellement utiles au Togo de 1950 à 2000. *Climatologie*, 7: 89-107.
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (1993). Carte pluviométrique de l'Algérie à l'échelle du 1/500.00 + notice explicative, Alger.
- Agrawala S. (2006). Placer le changement climatique au cœur du développement. In: Contre vents et marées: Les politiques de développement face au changement climatique. Editions OCDE. 23-46.
- Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T. C., & Wieringa J. (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. World climate program data and monitoring WCDMP, no 53, WMO-TD, no 1186. World Meteorological Organization, Geneva, 55.
- Alexandersson H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6): 661-75.
- Anser A. (1998). La pluviométrie en Algérie du Nord : évolution et variabilité (1931-1995). Thèse de Doctorat. Université de Constantine, Algérie.
- Aravena J.C. & Luckman B.H. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(14). 2106-20.
- Balah B. & Amarchi H. (2016). Variabilité des séries pluviométriques du bassin versant de la Seybouse du Nord Est-Algérien. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 32: 86-97.
- Batisani N. & Yarnal B. (2010). Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. *Applied Geography*. 30(4): 483-89.
- Beaulieu C., Ouarda T. B. & Seidou O. (2007). Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1): 18-37.
- Benhamrouche A., Boucherf D., Hamadache R., Bendahmane L., Martín Vide J. & Teixeira Nery J. (2015). Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Algeria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3): 617-25.
- Bessaklia H., Ghenim A.N., Megnounif A. & Martin-Vide J. (2018). Spatial variability of concentration and aggressiveness of precipitation in North-East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 36: 3-15.

- Bigot S., Camberlin P., Moron V., Richard Y. & Roucou P. (1995). Modes of rainfall variability in Tropical Africa and their stability through time. The 21st Conference of the American Meteorological Society: Hurricanes and Tropical Meteorology. 448-49.
- Bouroche J.M. & Saporta G. (1987). *L'analyse des données*. Coll. Que Sais-Je. Presses Universitaires de France.
- Brunetti M., Buffoni L., Maugeri M. & Nanni T. (2000). Precipitation intensity trends in northern Italy. *International Journal of Climatology*, 20: 1017-31.
- Brunetti M., Maugeri M. & Nanni T. (2001). Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *International Journal of Climatology*, 21: 861-71.
- Brutsaert W. & Parlange M.B. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396(6706): 30.
- Buishand T.A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58: 11-27.
- Buishand T.A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 58: 51-69.
- Caloiero T., Coscarelli R., Ferrari E. & Mancini M. (2011). Trend detection of annual and seasonal rainfall in Calabria southern Italy. *International Journal of Climatology*. 31(1): 44-56.
- Camberlin P. (1994). Les précipitations dans la corne orientale de l'Afrique: climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs océano-atmosphériques. Thèse de Doctorat. Univ. Dijon, France.
- Cannarozzo M., Noto L.V. & Viola F. (2006). Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921–2000). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18): 1201-1211.
- CCNUCC (2007). Investment and Financial Flows to Address Climate Change. Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn.
- Chadule G. (1994). *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. France: Masson.
- Chaouche K., Neppel L., Dieulin C., Pujol N., Ladouche B., Martin E., Salas D., Caballeroy A. (2010). Analysis of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3): 234-43.
- Chatfield C. (2000). *Time Series Forecasting*. CRC press.
- Chermat S. (1998). Les étages de végétation en Algérie nord orientale : Approche phytosociologique. Tome 1. Thèse de Magistère. Univ. de Sétif. Algérie.
- Chibane B., Bentchakal M., Medjerab A. & Benfares B. (2015). Etude de la variabilité et de la structure de pluie annuelle dans une région semi-aride : Cas du bassin versant de la Macta (Nord-Ouest Algérien). *LARHYSS Journal*, (23): 213-29.

- Conrad V. & Pollak C. (1962). *Methods in Climatology*. Cambridge: Harvard University Press.
- Cote M. (1998). Les régions bioclimatiques de l'Est Algérien. *Rhumel*, No. 6 .
- Cruz F.T., Narisma G.T., Villafuerte II M.Q., Chua K.C. & Olaguera L.M. (2013). A climatological analysis of the southwest monsoon rainfall in the Philippines. *Atmospheric research*, 122: 609-16.
- Da Silva R.M., Santos C.A., Moreira M., Corte-Real J., Silva V.C. & Medeiros I.C. (2015). Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2): 1205-21.
- Dagnélie P. (1970). *Théorie et méthodes statistiques*. Vol. 1 &2. Gembloux: Duculot.
- Dahman E.R. & Hall M.J. (1990). Screening of hydrological data. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Netherlands. Publication, (49).
- Descroix L., Viramontes D., Vauclin M., Barrios J.G., & Esteves M. (2001). Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 43(2): 115-35.
- Djoufack V. (2011). Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne, France.
- Donat M.G., Alexander L.V., Yang H., Durre I., Vose R., Dunn R.J.H., & Hewitson B. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5): 2098-2118.
- Douguédroit A. & Norrant C. (2003). Annual and seasonal century scale trends of the precipitation in the Mediterranean area during the twentieth century. *In: Mediterranean Climate*. Springer, Berlin, Heidelberg. 159-63.
- Driouech F. (2010). *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes*. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France.
- Duhan D. & Pandey A. (2013). Statistical analysis of long-term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India. *Atmospheric Research*. 122: 136-49.
- Dyer T.G.J. (1975). The assignment of Rainfall stations into homogeneous groups: An application of principal component analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(430): 1005-13.
- Feki M. (2009). Variabilité spatiotemporelle des précipitations dans l'extrême nord de la Tunisie. *Geographia Technica*. Numéro spécial, 2009 pp. 175-180.

- Fniguire F., Laftouhi N.E., Saidi M.E., Zamrane Z., El Himer H. & Khalil N. (2017). Spatial and temporal analysis of the drought vulnerability and risks over eight decades in a semi-arid region (Tensift basin: Morocco). *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2): 321-30.
- Fратиани S. & Acquavotta F. (2010). Les tendances et les indices de changement climatique des séries historiques dans le nord ouest de l'Italie. Le 23ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Rennes, France. 233–238.
- Ghachi A. (1986). *Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie*. Thèse. Doctorat, OPU, Algérie.
- Ghenim A.N. & Megnounif A. (2013). Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest algérien. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 24(2), 107-14.
- Ghenim A.N. & Megnounif A. (2016). Variability and trend of annual maximum daily rainfall in northern Algeria. *International Journal of Geophysics*, 2016, 1-11.
- GIEC (2007). Impacts adaptation and vulnerability: Summary for policymakers. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Giorgi F. & Lionello P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean Region. *Global and Planetary Change*, 632(3): 90-104.
- Giorgi F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8): 90-104.
- Glaçon J. (1967). Recherche sur la géologie et les gîtes métallifères du tell Sétifien (Algérie). *Bulletin de Géologie*, 32: 9-315.
- Gleick P.H. (1986). Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 88(1-2): 97-116.
- Gocic M. & Trajkovic S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100: 172-182.
- Gonzalez-Hidalgo J.C., Lopez-Bustins J.A., Štěpánek P., Martin-Vide J. & de Luis M. (2009). Monthly precipitation trends on the Mediterranean fringe of the Iberian Peninsula during the second-half of the twentieth century (1951–2000). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(10): 1415-1429.
- Goubanova K. & Li L. (2007). Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 57(1-2): 27-42.
- Gravetter F.J. & Wallnau L.B. (2011) *Essentials of Statistics for the Behavioral Sciences*. Wadsworth Cengage Learning.
- Griffiths G.M., Salinger M.J. & Leleu I. (2003). Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific convergence zone. *International Journal of Climatology*, 23: 847-869.

- Guidoum, A. (2017). Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien : Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines constantinoises et Chott Melghir (Coupe Nord-sud). Thèse de Doctorat. Université de Biskra, Algérie.
- Hair J.F. eds. (1995). *Multivariate Data Analysis: With Reading*. 4th ed. NJ: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Hair J.F., Black W.C., Babin B.J., Anderson R.E. & Tatham R.L. (1998). *Multivariate Data Analysis*. NJ: Prentice Hall. 207-219
- Hallouz F., Meddi M. & Mahe G. (2011). Analyse des ruptures dans les séries pluviométriques dans le bassin de l'oued Mina (Nord Ouest d'Algérie). Atelier SIG-MED Rabat.
- Hallouz F., Meddi M., Mahe G., Karahacane H. & Ali Rahmani S. (2019). Tendance des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 32(2): 83-114.
- Hlaoui Z. & Henia L. (2015). À propos de l'évolution des précipitations mensuelles et quotidiennes en Tunisie (1950-2010) : tendances ou non. Modélisations et variabilités. XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège. 515-520.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguier M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. & Johnson C.A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. NY: Cambridge University Press.
- Hubert P., Carbonnel J.P. & Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques : Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, 110(3-4): 349-367.
- Hulme M. (1996). Climate change and Southern Africa: an exploration of some potential impacts and implications in the SADC (Southern African Development Community) Région: a Report Commissioned by WWF International and Co-ordinated by the Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK. Climatic Research Unit, University of East Anglia.
- IPCC (2001). *Summary for policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.). Cambridge University Press.
- IPCC (2013). Climate change 2013: the physical science basis. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, BexV, Midgley PM (eds) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge.

- Javari M. (2016). Trend and homogeneity analysis of precipitation in Iran. *Climate*, 4(44): 1-23.
- Jemai S., Ellouze M., Agoubi B. & Abida H. (2016). Drought intensity and spatial variability in Gabes Watershed, South-Eastern Tunisia. *Journal of Water and Land Development*, 31(1): 63-72.
- Joseph R., Tin, M. & Kuma P. (2000). Multiple-scale spatio-temporal variability of precipitation over the coterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 1(5): 373-92.
- Kendall M.G. (1975). *Rank Correlation Measures*. 4th ed. London, U.K. Charles Griffin.
- Kendall S.M. & Stuart A. (1943). *The Advanced Theory of Statistics*. Vol. 1 & 2. London: Charles Griffin.
- Khaldi A. (2005). Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien Monts de Tlemcen-Saida. Thèse de Doctorat. Université d'Oran, Algérie.
- Khezazna A., Amarchi H., Derdous O. & Bousakhria F. (2017). Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades. *Journal of Water and Land Development*, 33(1): 79-88.
- Khoualdia W., Djebbar Y. & Hammar Y. (2014). Caractérisation de la variabilité climatique: cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 29: 6-23.
- Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges J., Hubert P. & Kallel R. (2000). Étude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. *Documents Techniques en Hydrologie*, (51): 341-45.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Dje K.B., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog: European Journal of Geography*, (513), 1-29.
- Kruger A.C. (2006). Observed trends in daily precipitation indices in South Africa: 1910–2004. *International Journal of Climatology*, 26: 2275-85.
- Lamarque Ph. & Jourdain S. (1994). Elaboration de longues séries climatologiques homogènes pour l'étude de l'évolution climatique. *La météorologie*, série 8, 7: 61-67
- Lanzante J.R. (1996). Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: Theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 16(11): 1197-1226.
- Lazri M., Ameer S., & Haddad B. (2007). Analyse de données de précipitations par approche markovienne. *LARHYSS Journal*, 9782(6): 7-20.
- Lebart L., Piron M. & Morineau A. (2000). *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. France: Dunod.

- Lee A.F.S. & Heghinian S.M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach. *Technometrics*, 19(4): 503-506.
- Lionello P. (2012). *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*. Netherlands: Elsevier.
- Lionello P., Malanotte-Rizzoli P., Boscolo R., Alpert, P., Artale V., Li, L. & Ulbrich U. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. In: Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R. (eds.). *Mediterranean Climate Variability*. Netherlands: Elsevier. 1-26.
- Longobardi A. & Villani P. (2010). Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean Area. *International Journal of Climatology*, 30: 1538-46.
- López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Angulo-Martínez M., Beguería S. & Kenawy A. (2010). Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955–2006. *International Journal of Climatology*, 30(7): 1026-41.
- Lubès H., Masson J.M. Servat E., Paturel J.E., Kouame B. & Boyer J.F. (1994) Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etudes bibliographiques. UR2-CEC, Orstom, Montpellier.
- Luterbacher J., Xoplaki E., Casty C., Wanner H., Pauling A., Küttel M., & García-Herrera R. (2006). Mediterranean climate variability over the last centuries: A review. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4: 27-148.
- Mann H.B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13(3): 245-259.
- Mare A. (1987). Etude géomorphologique du tell oriental Algérien : de Collo à la frontière Tunisienne. O.P.U, Tome 1. Thèse de Doctorat. Univ. d'Aix Marseille II, France.
- Matari A., Kerrouche M., Bousid H. & Douguedroit A. (1999). Sécheresse dans l'ouest algérien. *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 12: 98-106.
- Mebarki A. (2005). Hydrologie des bassins de l'est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Mentouri, Constantine, Algérie, 360 p.
- Meddi H. & Meddi M. (2007). Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Géographia Technica*, 2: 49-55.
- Meddi H. & Meddi M. (2009). Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 20(1): 57-65.
- Meddi M. & Toumi S. (2015). Spatial variability and cartography of maximum annual daily rainfall under different return periods in Northern Algeria. *Journal of Mountain Science*, 12(6): 1403-21.
- Meddi M., Meddi H., Toumi S. & Mehaiguen M. (2013). Regionalization of rainfall in Northwestern Algeria. *Geographia Technica*, 17(1): 56-69.
- Medjerab A. & Henia L. (2005). Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale. *Revue Géographique de l'Est*, 45(2): 113-120.

- Megnounif A. & Ghenim A.N. (2016). Rainfall irregularity and its impact on the sediment yield in Wadi Sebdou watershed, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4): 1-15.
- Merniz N., Tahar A. & Benmehaia M.A. (2019). Statistical assessment of rainfall variability and trends in northeastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 40 (I-III): 87-96.
- Merzougui A. & Slimani M. (2012). Régionalisation des lois de distribution des pluies mensuelles en Tunisie. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4): 668-85.
- Michaels P.J., Knappenberg P.C., Fraunfeld O.W. & Davis R.E. (2004). Trends in precipitation on the wettest days of the year across contiguous USA. *International Journal of Climatology*, 24: 1873-82.
- Moberg A. & Jones P. (2005). Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe. *International Journal of Climatology* 25: 1149-71.
- Modarres R. & da Silva V.D.P.R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 70(2): 344-55.
- Modarres R. & Sarhadi A. (2009). Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D3101): 1-9.
- Moisselin J. M., Schneider M. & Canellas C. (2002). Les changements climatiques en France au XX^e siècle: Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La météorologie*. Série 8, 38: 45-56.
- Moron V. (1996). Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992). *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 7(1): 25-32.
- Mosley M.P. (1981). Delimitation of New Zealand hydrologic regions. *Journal of Hydrology*, 49(1-2): 173-92.
- Mosmann V., Castro A., Fraile R., Dessens J. & Sanchez J.L. (2004). Detection of statistically significant trends in the summer precipitation of mainland Spain. *Atmospheric Research*, 70(1): 43-53.
- Mourato S., Moreira M. & Corte-Real J. (2010). Interannual variability of precipitation distribution patterns in southern Portugal. *International Journal of Climatology*, 30; 1784-94.
- Mrad D., Djebbar Y. & Hammar Y. (2018). Analysis of trend rainfall: Case of northeastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 36: 105-115.
- Mrad D., Djebbar Y. & Hammar Y. (2018). Analysis of trend rainfall: Case of northeastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 36: 105-15.
- Nasri M. & Modarres R. (2009). Dry spell trend analysis of Isfahan Province, Iran. *International Journal of Climatology*. 29: 1430-38.

- Nefzi A. (2012). Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture: étude théorique et application au cas de la Tunisie Thèse de Doctorat. AgroParisTech, France.
- Nel W. (2009). Rainfall trends in the KwaZulu-Natal Drakensberg Region of South Africa during the Twentieth Century. *International Journal of Climatology*, 29: 1634-41.
- Nicholls N. & Murray W. (1999). Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June. Breakout group B: Precipitation. *Climatic Change*, 42: 23-29.
- Niel H., Leduc C. & Dieulin C. (2005) Spatial and temporal variability of annual rainfall in the lake Chad basin during the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(2): 223-243.
- Norrant C. & Douguedroit A. (2006). Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950–2000). *Theoretical and Applied Climatology*, 83: 89-106.
- Norrant C. (2004). Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000: Etude diagnostique Thèse de Doctorat. Aix-Marseille 1. France.
- Nouaceur Z. & Murărescu O. (2016). Rainfall variability and trend analysis of annual rainfall in North Africa. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2016.
- Nouaceur Z., Laignel B. & Turki I. (2013). Changements climatiques au Maghreb: vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien? *Physio-Géo. Géographie Physique et Environnement*, 7: 307-23.
- Obot N.I., Chendo M.A.C., Udo S.O., & Ewona I.O. (2010). Evaluation of rainfall trends in Nigeria for 30 years (1978-2007). *International Journal of Physical Sciences*, 5(14): 2217-22.
- OMM (1966). Climatic change, by a working group of the Commission for Climatology. World Meteorological Organization, WMO 195, TP 100, Tech, Note no. 79.
- Partal T. & Kahya E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*, 20: 2011-26.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2): 126-135.
- Philandras C.M., Nastos P.T., Kapsomenakis J., Douvis K.C., Tselioudis G. & Zerefos C.S. (2011). Long-term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12): 3235-3250.
- Piervitali E., Colacino M. & Conte M. 1997. Signals of climatic change in the central-western Mediterranean basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 58(3-4): 211-219.
- Prat O.P. & Nelson B.R. (2014). Characteristics of annual, seasonal, and diurnal precipitation in the Southeastern United States derived from long-term remotely sensed data. *Atmospheric research*, 144: 4-20.

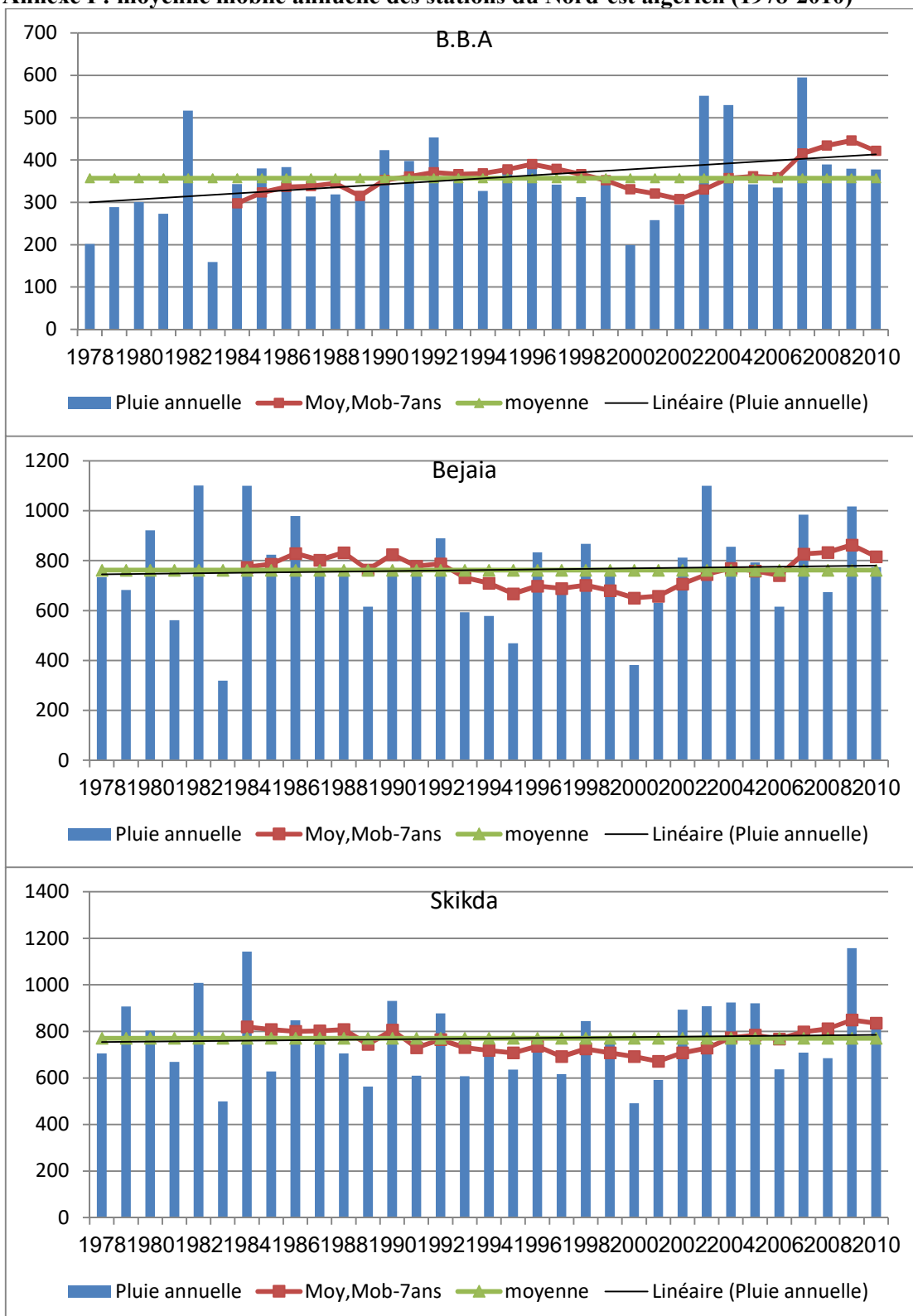
- Raymond F., Ullmann A. & Camberlin P. (2016). Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen: quelles tendances entre 1950 et 2013?. *Cybergéo: European Journal of Geography*, 2016.
- Renard B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France, Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique, Grenoble, France.
- Richman M.B. (1986). Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, 6(3): 293-335.
- Robson A.J., Jones T.K., Reed D.W. & Bayliss A.C. (1998). A study of national trend and variation in UK floods. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(2): 165-82.
- Rodrigo F.S. & Trigo R.M. (2007). Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology*, 27: 513-29.
- Ruiz Sinoga J.D., Garcia Marin R., Martinez Murillo J.F. & Gabarron Galeote M.A. (2011). Precipitation dynamics in southern Spain: Trends and cycles. *International Journal of Climatology*, 31: 2281-89.
- Ronchail J. & Gallaire R. (2006). ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(9), 1223-1236.
- Sanders L. (1989). L'analyse statistique des données en géographie. GIP Reclus.
- Sayemuzzaman M. & Jha M.K. (2014). Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina, United States. *Atmospheric Research*, 137: 183-194.
- Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Hsaine M. & Saloui A. (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 22(3): 139-148.
- Sebbar A., Hsaine M., Fougrach H. & Badri W. (2012). Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. Le 25ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie: Les climats régionaux: observation et modélisation. Grenoble. 709-714.
- Sebbar A., (2013). Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse de Doctorat en Bioclimatologie, Univ. Hassan II, Fac. Sci. Ben M'sik, Casablanca, 186 p.
- Sen-Roy S. & Balling R.C. (2004). Trends in extreme daily precipitation indices in India. *International Journal of Climatology*, 24: 457-66.
- Siew-Yan-Yu T.O., Rousselle J., Jacques G. & Nguyen V.T.V. (1998). Régionalisation du régime des précipitations dans la région des Bois-francs et de l'Estrie par l'analyse en composantes principales. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25: 1050-58.
- Singla S., Mahé G., Dieulin C., Driouech F., Milano M., El Guelai, F.Z., & Ardoin-Bardin, S. (2010). Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. The

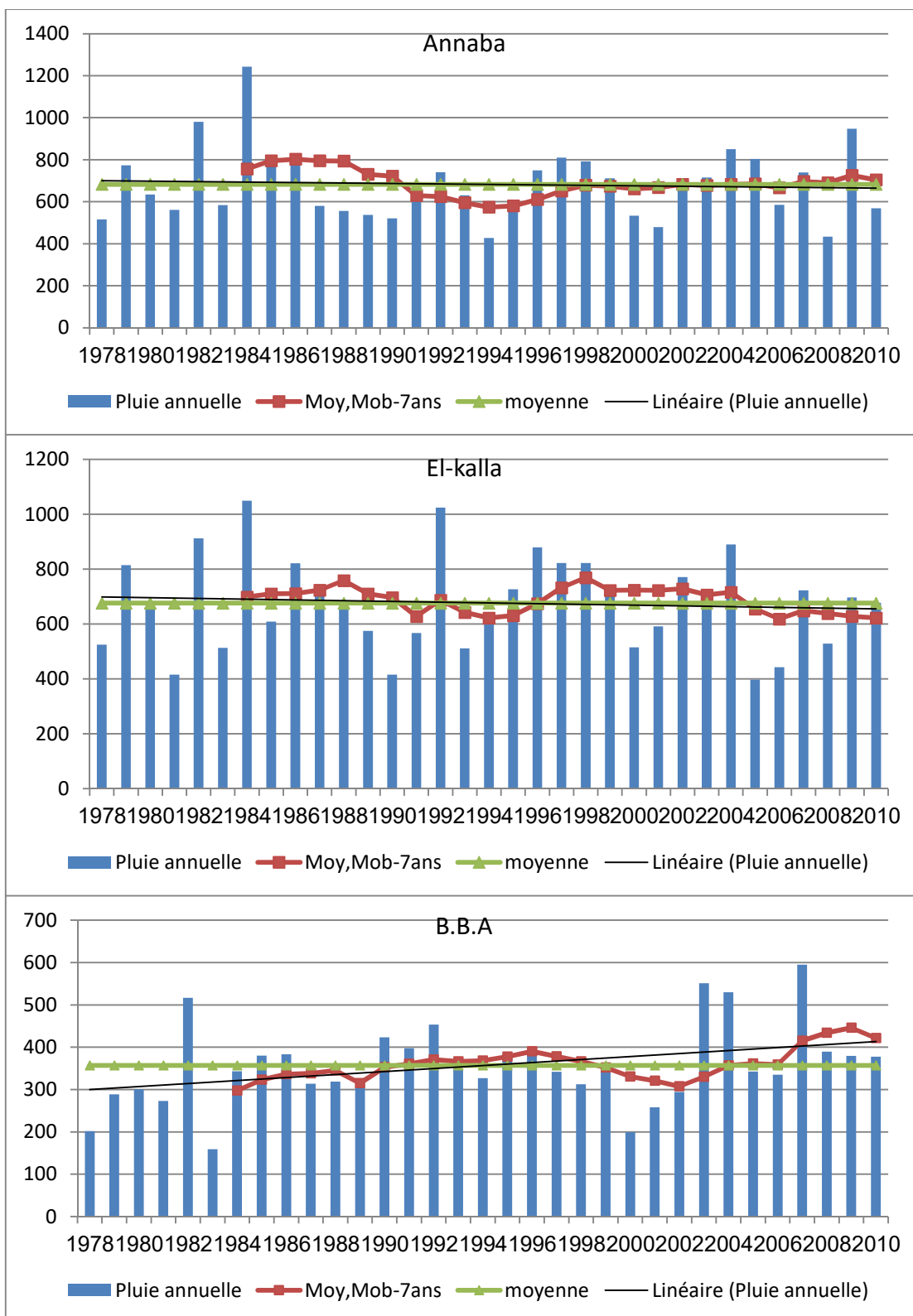
- Sixth World FRIEND Conference on Global change: Facing risks and threats to water resources. Fez, Morocco, October. IAHS Publ. 679-687.
- Slimani M., Cudennec C. & Feki H. (2007). Structure of the rainfall gradient in the Mediterranean–Sahara transition in Tunisia: Geographical determinants and seasonality. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6): 1088-1102.
- Sneyers R. (1990). Technical note No 143 on the statistical analysis of series of observations. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Sokal R.R. & Rohlf F.J. (1981). *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*.
- Soltani S., Saboohi R. & Yaghmaei L. (2012). Rainfall and rainy days trend in Iran. *Climatic Change*, 110(1-2): 187-213.
- Spiegel M.R., Ergas A. & Marcotorchino J.F. (1972). *Théorie et applications de la statistique*. New York: McGraw-Hill.
- Stepanek P. (2006). AnClim - Software for Time Series Analysis (for Windows). Department of Geography, Faculty of Natural Sciences, Masaryk University: Brno.
- Stour L. & Agoumi A. (2009). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie appliquée*, 16: 215-232.
- Tabari H. & Talaei P.H. (2011). Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. *Journal of Hydrology*, 396(3-4): 313-20.
- Tabari H., Somee B.S. & Zadeh M.R. (2011). Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmospheric Research*, 100(1): 132-40.
- Taibi S., Meddi M., Mahé G. & Assani A. (2015). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1-2): 241-57.
- Taibi S., Meddi M., Souag D. & Mahé G. (2013). Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *Climate and land surface changes in hydrology*, Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July. *IAHS Publ.* 359. 191-197.
- Talia A., Meddi M. & Bekkoussa B.S. (2011). Étude de la variabilité de la pluviométrie dans les hauts plateaux et le Sahara algériens. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 22(3): 149-58.
- Traboulsi M. (2010). Les précipitations dans les Marges arides de la Syrie du Nord. *Travaux de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée*, 55(1): 73-95.
- Tramblay Y., El Adloun, S. & Servat E. (2013). Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 3235-48.
- Türkeş M., Koç T. & Sariş F. (2008). Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29: 1056-74.

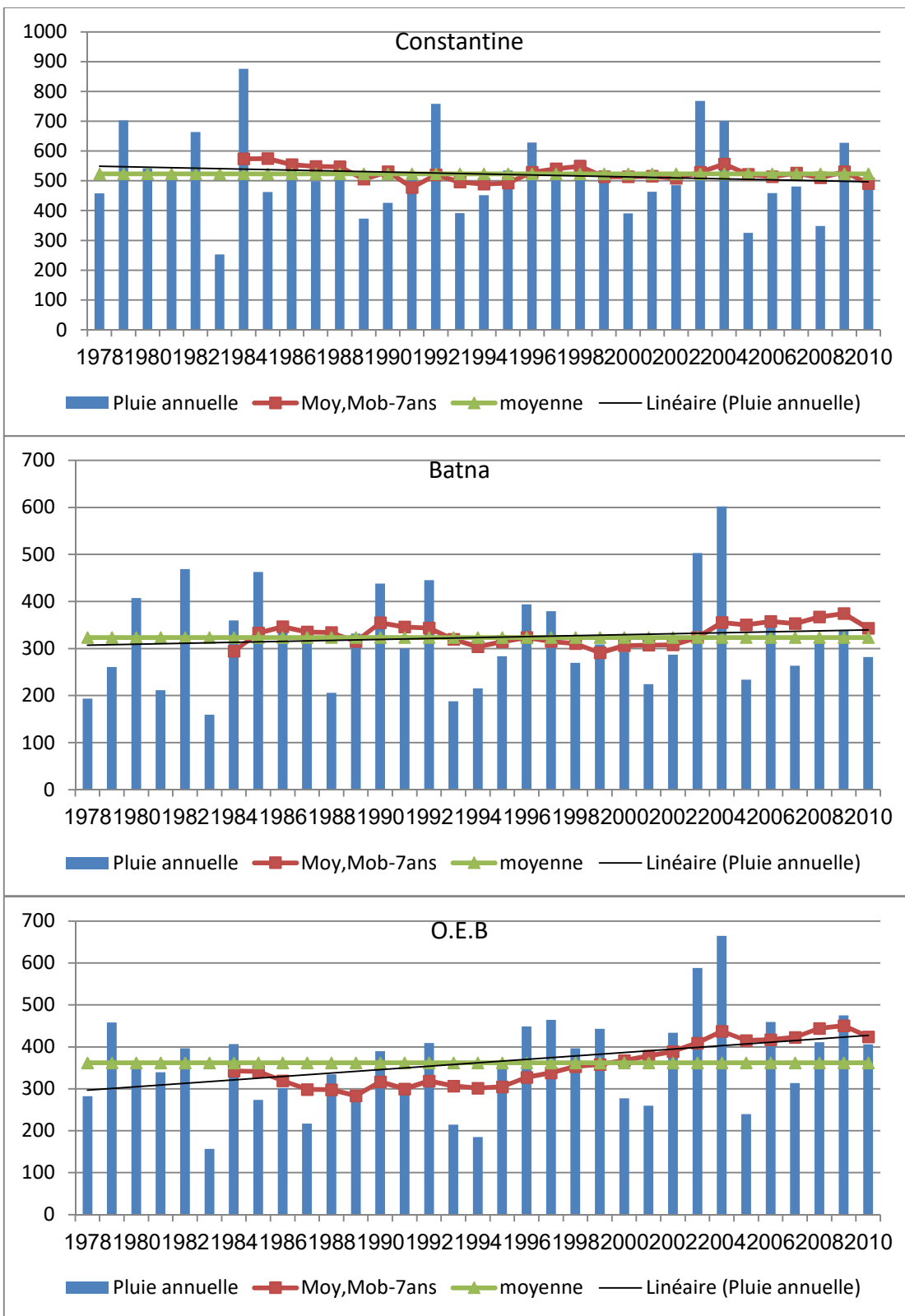
- Ulbrich U., May W., Li L., Lionello P., Pinto J.G. & Somot S. (2006). The Mediterranean climate change under global warming. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4: 399-415.
- UNFCCC (2007). Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptation in Developing Countries. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Bonn, Germany.
- Valdez-Cepeda R.D., Hernandez-Ramirez D., Mendoza B., Valdés-Galicia J. & Maravilla D. (2003). Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals*, 11(02): 137-144.
- Von Neumann J., 1941. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(4): 367-395.
- Von Storch H. & Zwiers F.W. (2001). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.
- Wang X.L., Wen Q.H. & Wu Y. (2007). Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6): 916-931.
- WMO (2002). World Meteorological Organization. Bureau de l'information et des relations publiques. Note d'information no. 678, Août.
- Xoplaki E., González-Rouco J.F., Luterbacher J. & Wanner H. (2004). Wet season Mediterranean precipitation variability: Influence of large-scale dynamics and trends. *Climate Dynamics*, 23(1): 63-78.
- Yenigün K., Gümüş V. & Bulut H. (2008). Trends in streamflow of the Euphrates basin, Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*. 161(4): 189-98.
- Yue S., Pilon P., Phinney R. & Cavadias G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Process*, 16:1807-29.
- Zerouali B., Chettih M., Abda Z., Mesbah M. & Djemai M. (2020). The use of hybrid methods for change points and trends detection in rainfall series of northern Algeria. *Acta Geophysica*, 68(5): 1443-60.
- Zhao W., Yu X., Ma H., Zhu Q., Zhang Y., Qin W. & Wang Y. (2015). Analysis of precipitation characteristics during 1957–2012 in the semi-arid loess plateau, China. *PloSOne*. 10(11): 1-13.

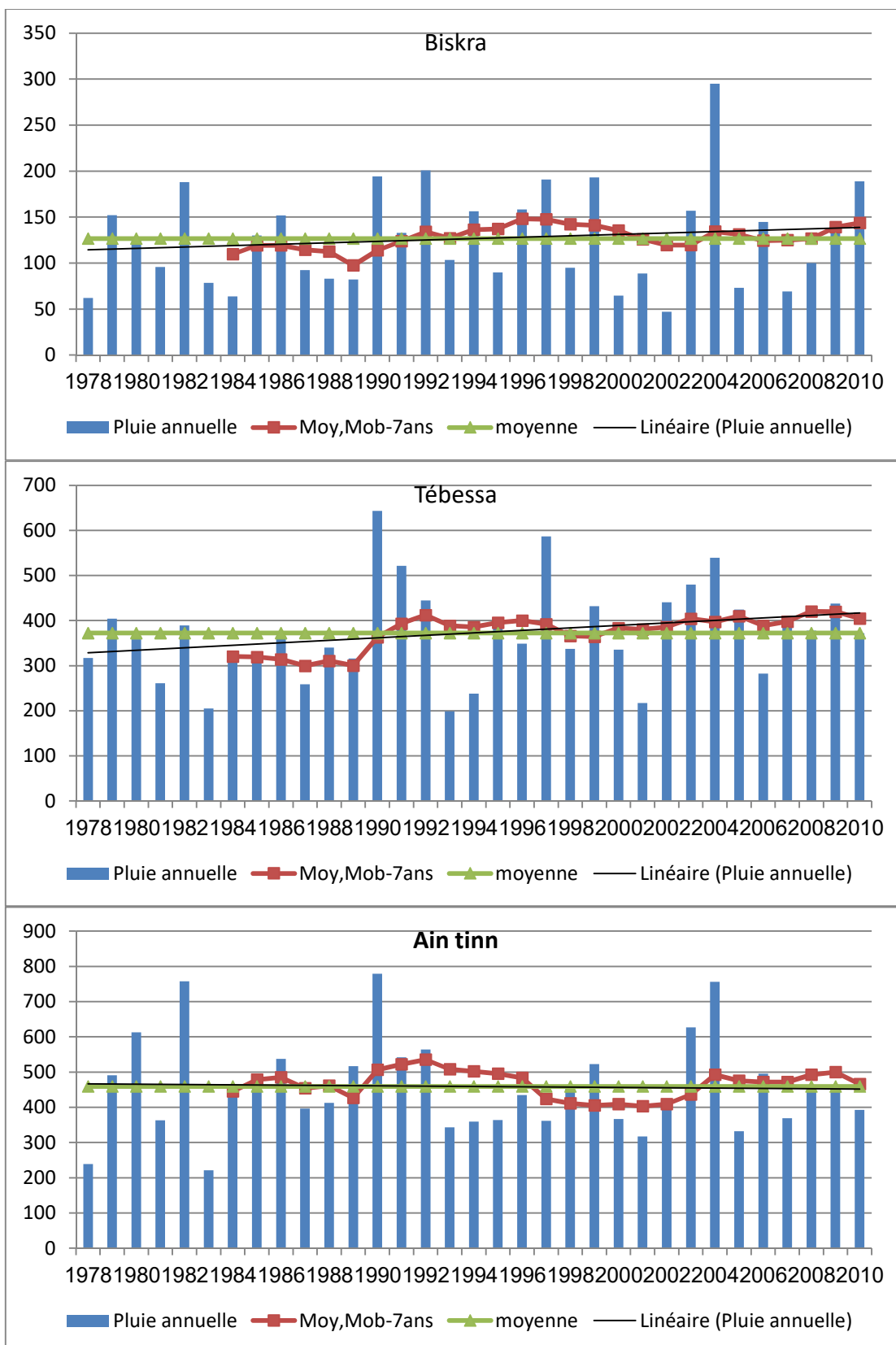
Annexes

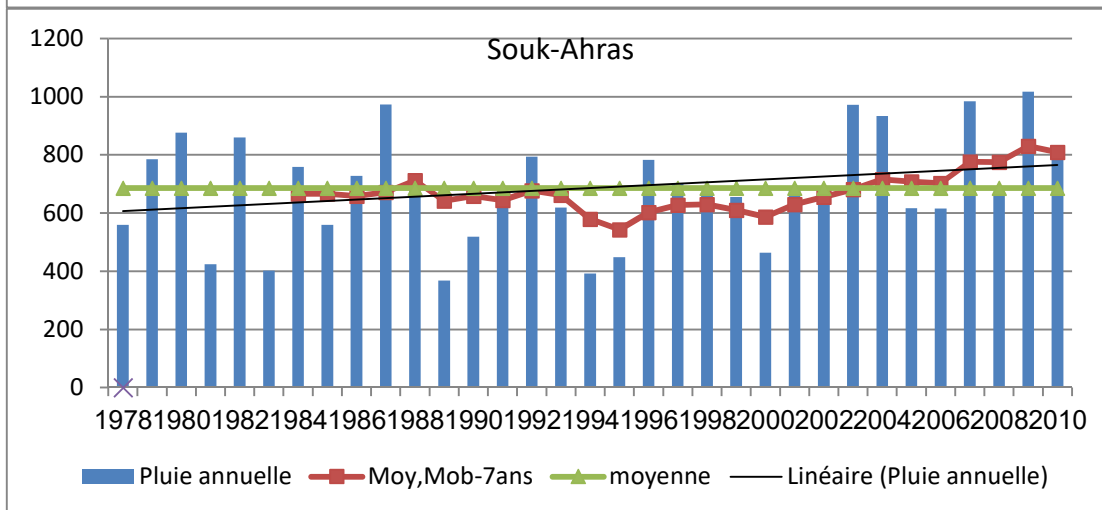
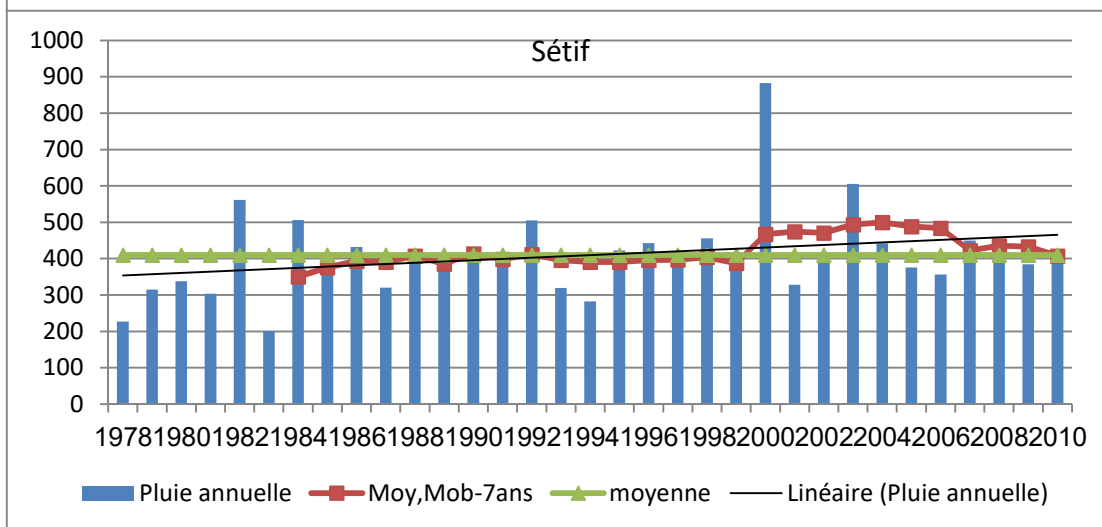
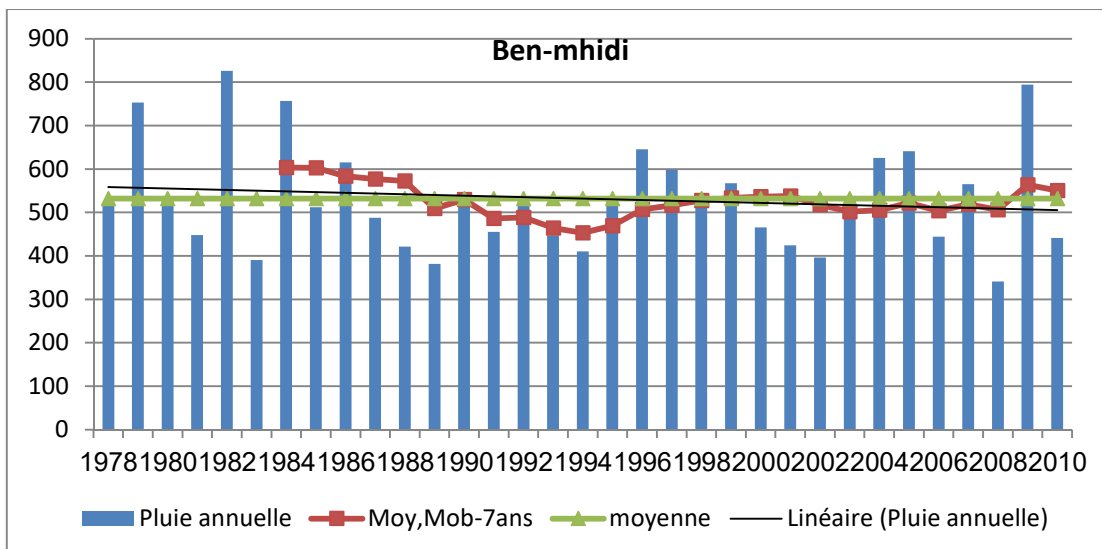
Annexe I : moyenne mobile annuelle des stations du Nord-est algérien (1978-2010)

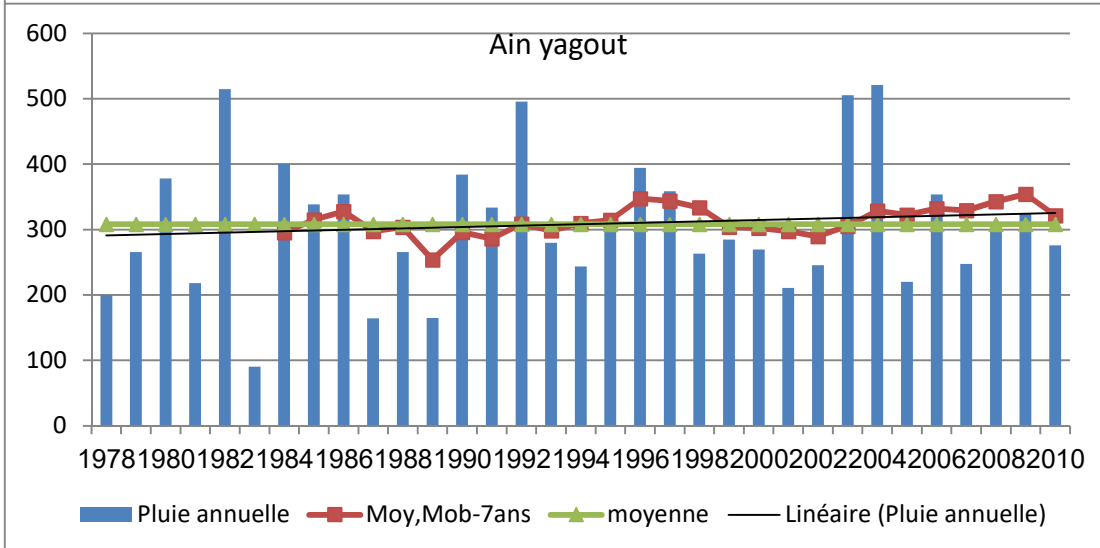
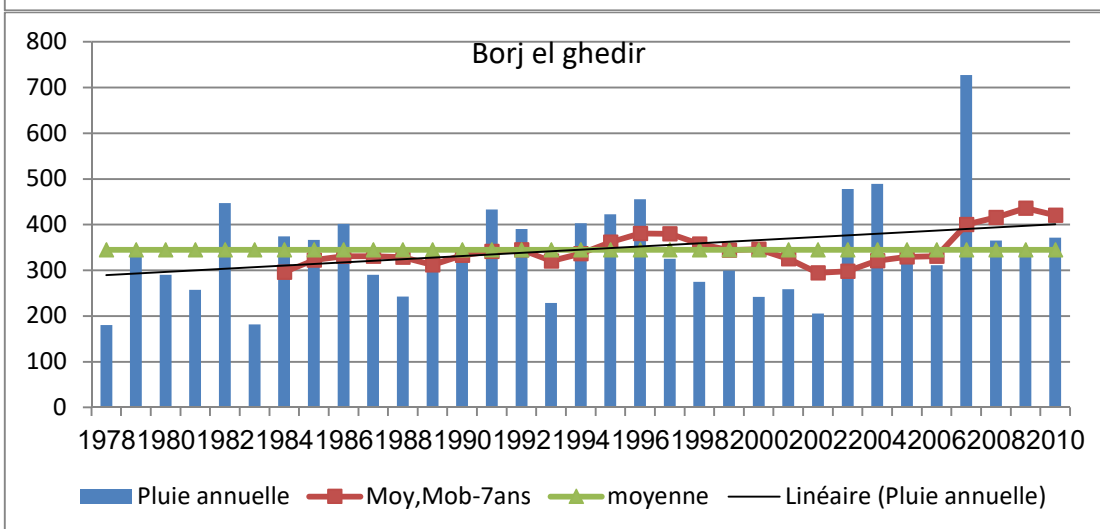
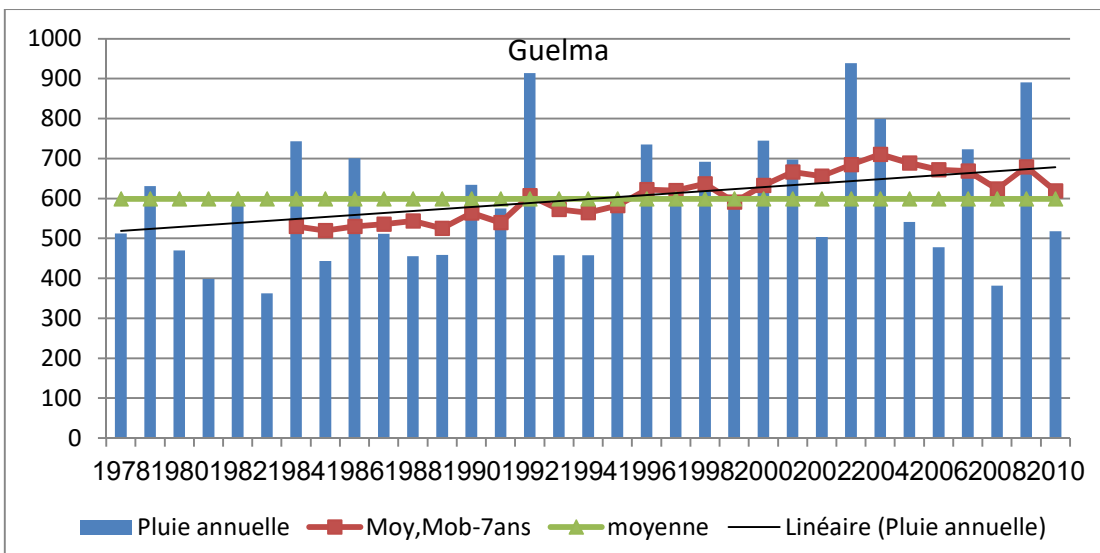


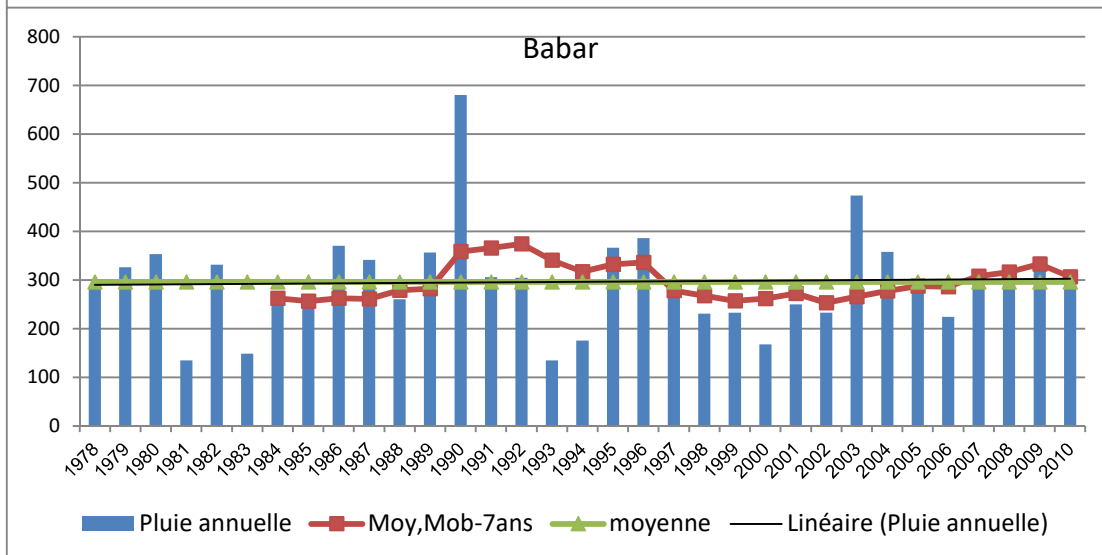
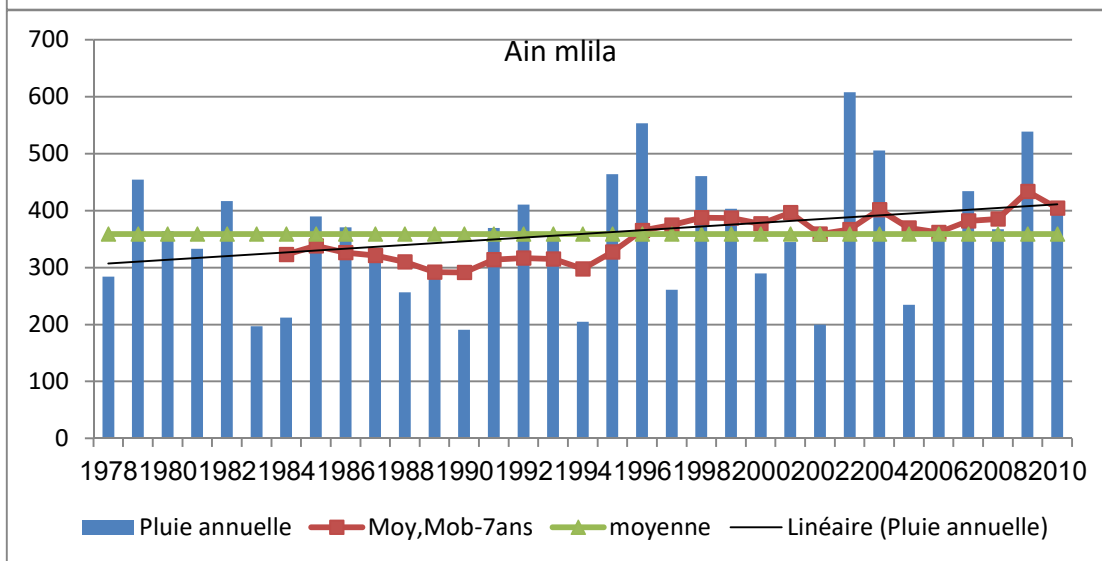
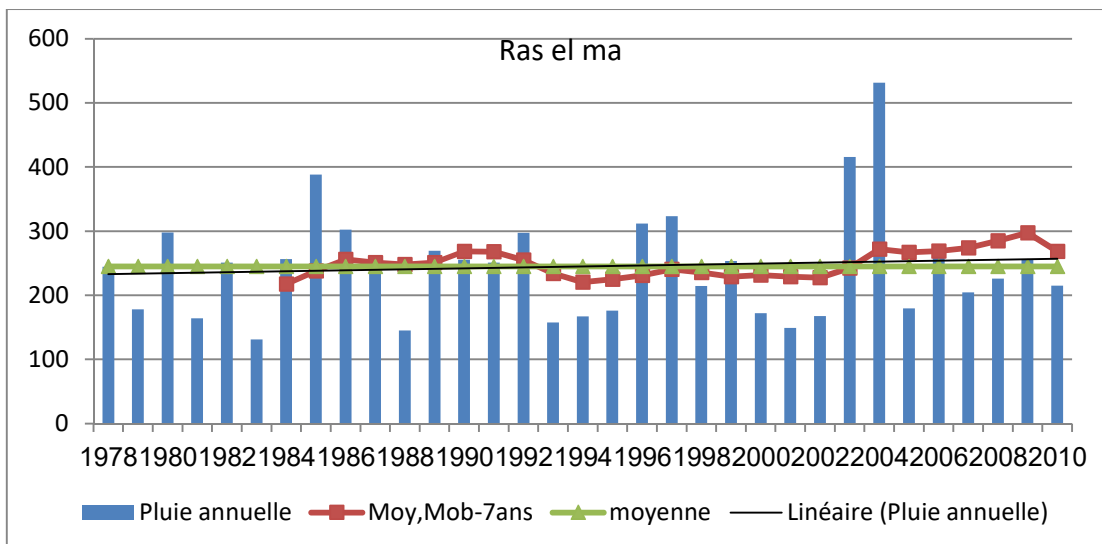


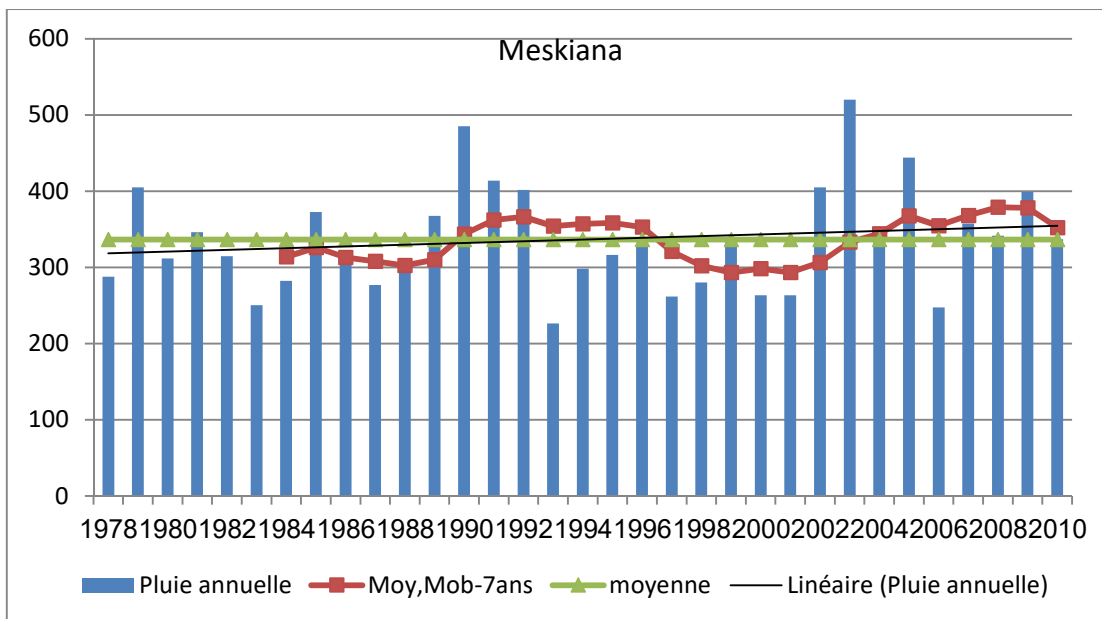




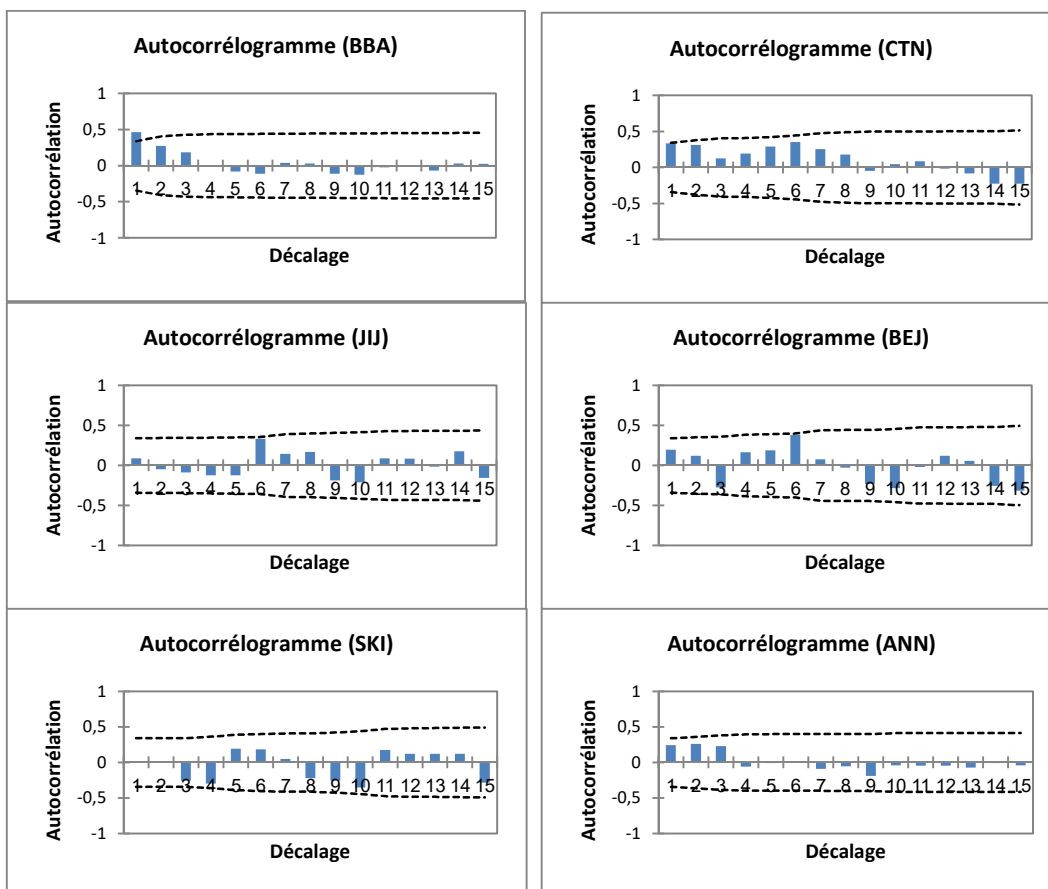


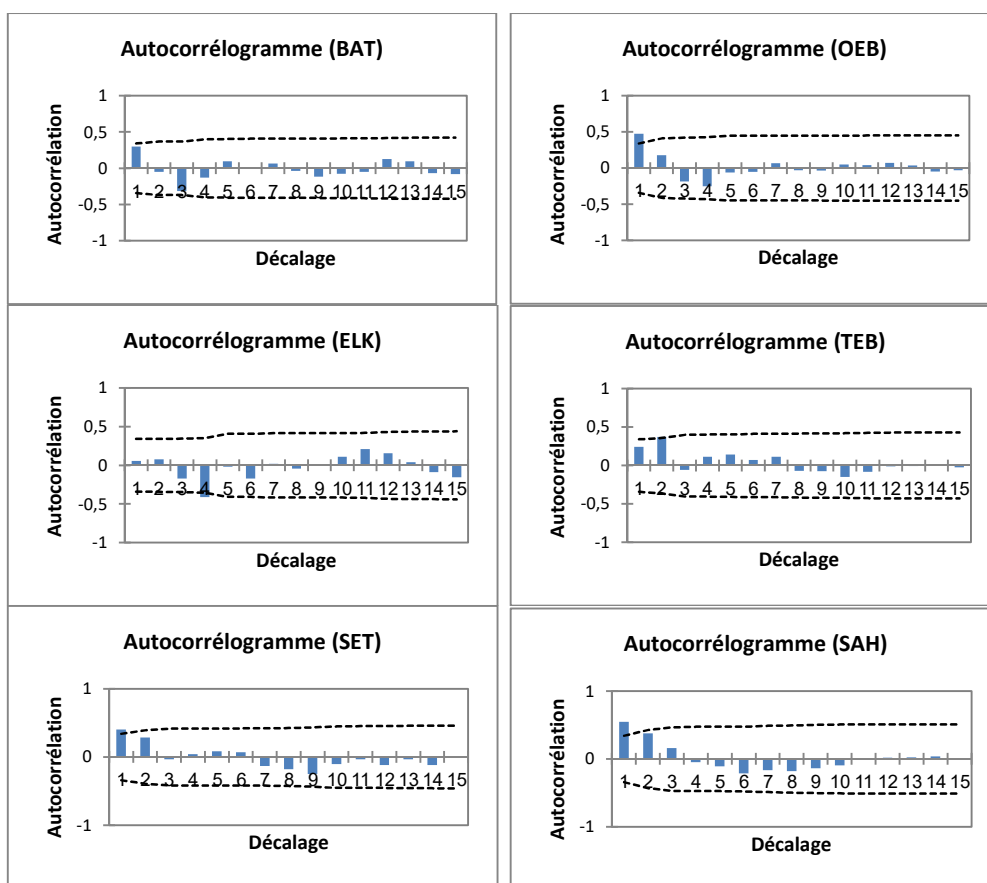






Annexe II : Fonction d'autocorrélation du nombre de jours de pluie pour les stations d'études (période 1978-2010).





Annexe III : Variabilité des précipitations mensuelles dans les stations étudiées.

Station	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JLL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
BBA	0,798	0,621	0,984	0,642	0,791	0,820	1,398	0,865	0,733	0,731	0,662	0,719
CTN	0,715	0,732	0,556	0,680	0,619	0,900	1,272	0,809	0,680	0,670	0,753	0,814
JIJ	0,614	0,629	0,698	0,569	0,765	1,180	1,590	1,542	0,793	0,770	0,539	0,645
BEJ	0,743	0,611	0,677	0,666	0,748	1,134	1,516	1,124	0,838	0,833	0,559	0,664
SKI	0,542	0,604	0,570	0,693	0,857	0,937	1,863	1,579	0,813	0,626	0,640	0,576
ANN	0,625	0,611	0,559	0,648	0,694	0,951	1,488	1,457	0,757	0,830	0,605	0,561
BAT	0,866	0,810	0,696	0,672	0,902	0,964	2,118	1,229	0,572	0,803	0,936	0,752
OEB	0,826	0,826	0,561	0,746	0,687	0,919	1,114	0,935	0,777	0,618	0,878	0,942
ELK	0,552	0,658	0,616	0,645	0,842	1,261	1,867	2,383	0,685	0,667	0,518	0,567
BIS	1,368	1,295	1,374	1,458	1,376	1,337	1,957	1,624	1,305	1,311	1,142	0,983
TEB	0,805	0,945	0,674	0,766	0,567	0,882	1,140	1,062	0,722	0,734	0,866	1,150
ATN	0,950	0,870	0,735	0,683	0,846	0,885	1,166	1,132	0,610	0,812	0,918	0,679
SET	0,735	0,660	0,662	0,532	0,693	0,887	1,209	0,818	0,711	0,692	0,716	1,539
SAH	0,710	0,757	0,547	0,694	0,790	0,959	1,278	1,000	0,914	0,673	0,755	0,698
GMA	0,642	0,704	0,619	0,700	0,688	1,188	1,128	1,344	0,838	0,728	0,852	0,774
BGD	0,714	0,710	1,005	0,905	0,878	0,985	1,751	1,061	0,758	0,897	0,661	0,708
AYG	0,877	0,899	0,762	0,699	0,963	0,923	1,362	1,411	0,724	0,929	0,979	0,799
RMA	0,792	0,784	0,803	0,782	0,914	0,978	2,393	1,288	0,755	0,982	0,895	0,886
AML	0,826	0,789	0,561	0,648	0,676	1,071	1,611	1,776	0,866	0,837	0,969	0,694
BAB	0,900	1,064	0,852	0,772	1,021	0,879	1,365	1,193	0,814	0,880	0,851	0,902
BMH	0,490	0,630	0,582	0,656	0,670	1,136	2,164	1,752	0,884	0,714	0,600	0,573
MES	0,846	0,647	0,540	0,666	0,541	0,544	0,743	0,998	0,582	0,673	0,663	0,555
Moy	0,770	0,766	0,711	0,724	0,797	0,987	1,523	1,290	0,779	0,791	0,771	0,781
Min	0,490	0,604	0,540	0,532	0,541	0,544	0,743	0,809	0,572	0,618	0,518	0,555
Max	1,368	1,295	1,374	1,458	1,376	1,337	2,393	2,383	1,305	1,311	1,142	1,539

Résumé

La variabilité des précipitations est l'un des éléments le plus important pour les études climatiques et hydrométéorologiques. Les pays Nord africains, et spécifiquement l'Algérie présentent une sensibilité accrue à la variabilité climatique, et des précipitations en particulier, en raison de leurs effets sur la structure économique, sociale et démographique.

Dans la présente étude, l'objectif principal est de contribuer à une meilleure connaissance de la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour 22 stations pluviométriques réparties dans le Nord-Est algérien pour la période 1978-2010.

Les résultats ont montré, que spatialement, les précipitations diminuent du Nord au Sud et d'Est en Ouest. L'application du test de Mann-Kendall aux données chronologiques a montré que pour les précipitations annuelles, toutes les stations ne présentaient pas de tendances statistiquement significative, contrairement aux nombres de jours pluvieux, ou on'a constaté qu'il y'a une tendance négative significative dans quatre stations (Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi et Tébessa). Pour les séries chronologiques mensuelles, les tendances positives significatives sont observées durant les mois de septembre dans les stations littorales et juillet pour les stations des hauts plateaux et le sud de l'Atlas saharien, tandis que les tendances significatives négatives sont enregistrées durant les mois de février et mars dans les stations de l'extrême Est de la région d'étude. La régionalisation des stations du Nord-Est algérien, en fonction de la variabilité interannuelle par l'analyse des composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CAH) a permet d'identifier cinq groupes de stations bien distincts pour la période 1978-2010.

Ces résultats indiquaient que pour la période analysée, il n'y avait pas un changement climatique important dans le Nord-Est algérien, mais plutôt on assiste à un décalage saisonnier.

Mots clés : *Nord-Est algérien, variabilité climatique, précipitation, tendance, régionalisation, test de Mann-Kendall.*

Abstract

Precipitation variability is one of the most important elements for climate and hydrometeorological studies. North African countries, and specifically Algeria, have an increased sensitivity to climate variability, particularly the precipitation, due to its effect on economic, social and demographic structure.

In the present study, the main objective is to contribute to a better understanding of the spatial and temporal variability of rainfall for 22 meteorological stations distributed in Northeastern Algeria for the period 1978-2010.

The results showed that, spatially, precipitation decreases from North to South and from East to West. The application of the Mann–Kendall test to the time series data showed that for annual precipitation, no station showed statistically significant trends, unlike the number of rainy days, where there was a significant negative trend in four stations (Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi and Tébessa). For the monthly time series, significant positive trends were observed during the months of September in the coastal stations and July for the plateaus and southern Saharan Atlas stations, while significant negative trends were recorded during the months of February and March for the stations of the extreme East in the study area.

The regionalization of stations in northeastern Algeria based on inter-annual variability through Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Ascending Classification (HAC) has identified five distinct groups of stations for the period 1978-2010.

These results revealed that for the period analyzed, there was no significant climate change in northeastern Algeria but there is a seasonal delay.

Keywords: *Northeastern Algeria, climate variability, precipitation, trend, regionalization, Mann-Kendall test.*

ملخص

تعدّ تقلّبات هطول الأمطار أحد أهم عناصر دراسات المناخ والأرصاد الجوية-المائية. لدى بلدان شمال إفريقيا، وتحديدًا الجزائر، حساسية متزايدة لتقلب المناخ، لا سيما هطول الأمطار، نظرًا لتأثيرها على البنية الاقتصادية والاجتماعية والديموغرافية.

في هذه الدراسة، الهدف الرئيسي هو المساهمة في فهم أفضل للتغيّر المكاني والزمني لهطول الأمطار لـ 22 محطة أرصاد جوية موزعة في شمال شرق الجزائر للفترة 1978-2010.

أظهرت النتائج، من حيث المكان، انخفاض هطول الأمطار من الشمال إلى الجنوب ومن الشرق إلى الغرب. أظهر تطبيق اختبار مان-كيندال (Mann-Kendall) على بيانات السلاسل الزمنية أنه بالنسبة للهطول السنوي لم تظهر أيّ محطة اتجاهات ذات دلالة إحصائية، على عكس عدد الأيام الممطرة، حيث كان هناك اتجاه سلبي ذا دلالة إحصائية في أربع محطات (جيجل، قسنطينة، أم البواقي وتبسة). بالنسبة للفترات الزمنية الشهرية، لوحظ تواجد اتجاهات إيجابية ذات دلالة إحصائية خلال شهري سبتمبر في المحطات الساحلية وجويلية في محطات الهضاب وجنوب الأطلس الصحراوي، بينما تمّ تسجيل اتجاهات سلبية ذات دلالة إحصائية خلال شهري فيفري ومارس لمحطات أقصى الشرق في منطقة الدراسة.

حدّد إجراء الأقلمة على محطات شمال شرق الجزائر، استنادًا إلى التقلبية السنوية من خلال تحليل المكونات الرئيسية (PCA) والتصنيف الهرمي التصاعدي (HAC)، خمس مجموعات متميزة من المحطات للفترة 1978-2010.

كشفت هذه النتائج أنه خلال الفترة التي تمّ تحليلها، لم يكن هناك تغيّر مناخي معتبر في شمال شرق الجزائر ولكن هناك إزاحة موسمية.

كلمات مفتاحية: شمال شرق الجزائر، تغيّرات المناخ، هطول الأمطار، الاتجاه، الأقلمة، اختبار مان-كيندال

Nom : MERNIZ Prénom : Noureddine	Date de soutenance : 02/03/2021
N° d'ordre : 24/DS/2021 N° de série : 02/ECO/2021	
Thème : Etude de la variation spatiotemporelle des précipitations dans le Nord-Est algérien	
<p>Résumé :</p> <p>La variabilité des précipitations est l'un des éléments le plus important pour les études climatiques et hydrométéorologiques. Les pays Nord africains, et spécifiquement l'Algérie présentent une sensibilité accrue à la variabilité climatique, et des précipitations en particulier, en raison de leurs effets sur la structure économique, sociale et démographique.</p> <p>Dans la présente étude, l'objectif principal est de contribuer à une meilleure connaissance de la variabilité spatio-temporelle des précipitations pour 22 stations pluviométriques réparties dans le Nord-Est algérien pour la période 1978-2010.</p> <p>Les résultats ont montré, que spatialement, les précipitations diminuent du Nord au Sud et d'Est en Ouest. L'application du test de Mann-Kendall aux données chronologiques a montré que pour les précipitations annuelles, toutes les stations ne présentaient pas de tendances statistiquement significative, contrairement aux nombres de jours pluvieux, où on a constaté qu'il y'a une tendance négative significative dans quatre stations (Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi et Tébessa). Pour les séries chronologiques mensuelles, les tendances positives significatives sont observées durant les mois de septembre dans les stations littorales et juillet pour les stations des hauts plateaux et le sud de l'Atlas saharien, tandis que les tendances significatives négatives sont enregistrées durant les mois de février et mars dans les stations de l'extrême Est de la région d'étude.</p> <p>La régionalisation des stations du Nord-Est algérien, en fonction de la variabilité interannuelle par l'analyse des composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CAH) a permis d'identifier cinq groupes de stations bien distincts pour la période 1978-2010.</p> <p>Ces résultats indiquaient que pour la période analysée, il n'y avait pas un changement climatique important dans le Nord-Est algérien, mais plutôt on assiste à un décalage saisonnier.</p>	
<p>Mots clés : <i>Nord-Est algérien, variabilité climatique, précipitation, tendance, régionalisation, test de Mann-Kendall.</i></p>	
<p>Président : <u>HAMIDECHI M. Abdelhafid</u> Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1 Directeur de thèse : TAHAR Ali Pr. Université Badji Mokhtar-Annaba Examineurs : HOUHAMDI Moussa Pr. Université 8 mai 1945. Guelma SAHLI Leila Pr. Université Frères Mentouri-Constantine1 BAZRI Kamel Eddine M.C.A. Université Frères Mentouri-Constantine1 MOSTEPHAOUI Tewfik M.C.A. C.R.S.T.R.A. Biskra</p>	