

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة
Année 2017

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'Hydraulique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Option: Hydraulique

THEME

Les changements climatiques au Nord-est algérien Evolution récente et projections futures

Par

KHEZAZNA AMINA

DIRECTEUR DE THESE : M. AMARCHI HOCINE

Pr. U.B.M .Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

DJEMILI LAKHDAR. Pr. Université BADJI Mokhtar Annaba

EXAMINATEURS :

BOUDOUKHA ABDERRAHMANE Pr. Université de Batna 2

BENABDESSLEM TAMARA M.C.A. Université BADJI Mokhtar Annaba

ZEGHADNIA LOTFI M.C.A. Université de Souk Ahras

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes Parents, mon Marie, mon fils Islem
et à mes sœurs

Et aussi à toute la famille KHEZAZNA et
mes amies.

A tous ceux qui ont contribué de près ou
de loin à ma réussite.

REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier Dieu qui m'a donné le courage pour compléter ce modeste travail.

Je tiens à présenter mes humbles et sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon directeur de Thèse le Professeur **AMARCHI Hocine**, pour toute son aide et ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté pour l'aboutissement de ce travail.

Tous mes vifs remerciements vont également à Monsieur **DJEMILI Lakhdar** Professeur à l'université d'Annaba et président de membre du jury, à madame **BENABDESELAM Tamara** docteur à l'université d'Annaba, à **BOUDOUKHA Abderrahmane** Professeur à l'Université de Batna (2) et au docteur **ZEGHADNIA Lotfi** de l'université de Souk Ahras qui m'ont fait l'honneur de participer aux membres de jury de ma soutenance.

Mes grands remerciements à Monsieur **BOUTAGHANE Hamouda** docteur à l'Université BADJI Mokhtar Annaba pour ces précieux conseils.

Et je tiens à remercie également toute ma famille pour toutes leurs aident et soutien.

:

في العقود الأخيرة، وعززت تغير المناخ المتطرفة الهيدرولوجية (الأمطار الغزيرة والفيضانات، والجفاف، ..) تغير المناخ قد تم الاعتراف بها باعتبارها تطوراً كبيراً على المستوى المحلي، وإقليمية و حتى دولية. تغير المناخ ينبع الجفاف، التي تتميز بنقص الأمطار ، وتدفقات منخفضة للغاية لمستجمعات المياه الرئيسية والموارد المائية السطحية وبالتالي فإن الكميات المخزنة خاضعة للانخفاض. قضية المياه تحمل تحدياً مستمراً للبلدان المطلة على البحر الأبيض المتوسط، وغرب أفريقيا بصفة عامة والجزائر على وجه الخصوص. الطلب يتزايد .

هذه الدراسة تهدف تتميز تقلية المناخ في شمال شرق الجزائر، وتحديداً في موقع الدراسة حوض سيبوس. لهذا اعتمدت الدراسة على مختلف البيانات المناخية على مدى فترة (42) سنة. محطات الهيدرومترية التي يتم توزيعها على موقع الدراسة. وفي هذا السياق فإننا نقترح دراسة التباين المكاني والزمني للنظام السنوي لهطول أمطار هطول الأمطار، وأولاً سنقوم بتحليل حجم التغير المطلق على المجموع السنوية لسلط الضوء على الخلافات والخصائص الإقليمية من شدة التغير الهيكلي السنوي، والثانية، سنلقي نظرة التطور الزمني لهطول الأمطار السنوي. في النهاية، تحليل للتغيرات المكانية لهطول الأمطار، وكانت تستخدم الاختبارات الإحصائية المختلفة: (اختبار تغير المنحدر سين، واختبار مان وكيندال، متابعة مان كندال واختبار بيتنيت) لتقدير حجم هذا الاتجاه، وتحديد مواعيد لاتجاهات وتغيير الزمان فواصل وتغيير المناخ.

المotor الثاني هو توصيف الجفاف الأرصاد الجوية والتقلبات في النطاق المكاني والزمني، والهدف هو تحليل ورسم خريطة لاتجاهات والتقلبات في معدلات سقوط الأمطار في مستجمع المياه. استخدام مؤشرات الجفاف الأرصاد الجوية وتوصيف المكاني لهطول الأمطار (مؤشرات هطول الأمطار رسم الخرائط).

ظهرت نتائج تقلبات هطول الأمطار، ويتميز عن طريق التناوب المرحلة الجافة في العقود 70 80 90 90 الرابط جديد في منتصف 2000. تظهر سلسلة الأمطار التاريخية تحولاً حقيقياً. وكان لتتنوع المعلومات المناخ له تأثير مع ذلك، فإن الجفاف ويتبعه اتجاه متزايد.

أن تحول لفترة طويلة من الجفاف مع شدة معتدلة، تليها فترة طويلة من الرطوبة في معظم منطقة الدراسة. ذلك، الاستفادة من المؤشر المعياري للهطول (SPI) على حوض سيبوس بأكمله في نظم المعلومات الجغرافية، سمح لعرض وتقييم العلاقة تطور مؤقت المكاني من الجفاف في المنطقة من شأنها أن تساعد صناع في إدارة الموارد المائية والزراعة والأنشطة الأخرى التي يتحمل أن تكون مصابة بالجفاف.

:

تقلب هطول الأمطار، وتقلب المناخ، والاختبارات الإحصائية والجفاف ومستجمعات المياه سيبوس ، شمال شرق الجزائر.

Résumé :

Durant ces dernières décennies, les changements climatiques qui ont amplifié les événements hydrologiques extrêmes (**pluies torrentielles, inondations, sécheresses, . .**) Et le problème de changement climatique a été reconnu comme l'un des majeurs du développement à l'échelle locale, et régionale voire même à l'échelle internationale. Le changement climatique a produit des périodes de sécheresse, qui sont caractérisées par des pluviométries déficitaires, et des écoulements très faibles des principaux bassins versants, les ressources en eau de surface et par conséquent, les volumes stockés subissent une diminution. La question d'eau constitue un défi permanent pour les pays riverains de la Méditerranée, l'Afrique de l'Ouest en général et l'Algérie en particulier. La demande est en constante augmentation.

Cette étude a pour objectif caractérisé la variabilité du climat au Nord-est algérien, précisément dans le bassin Seybouse site de l'étude. Pour cela, diverses données climatiques sur des périodes allant de (42) ans, cette étude s'est appuyée sur des séries de pluies de (13) stations, postes pluviométriques et hydrométriques qui sont réparties sur la surface étudiée. Dans ce cadre, nous proposons d'étudier la variabilité spatiale et temporelle du régime pluviométrique annuel. Dans un premier temps, nous allons analyser l'ampleur de la variabilité absolue, relative aux totaux annuels pour mettre en évidence, les contrastes régionaux et caractéristiques de l'intensité de la variabilité structurelle annuelle, en second lieu, nous allons étudier Évolution temporelle des précipitations annuelles. A la fin, une analyse de la variabilité des tendances pluviométriques, différents tests statistiques ont été utilisés : (**test d'estimation la pente de Sen, test de Mann-Kendall, test séquentiel de Mann Kandell et le test de Pettit**), pour évaluer la magnitude de la tendance, identifier et déterminer les dates des tendances, et localiser temporellement les ruptures et les changements climatiques.

Le deuxième axe est la caractérisation de la sécheresse météorologique et la variabilité dans une échelle spatiale et temporelle, le but, est d'analyser et cartographier les tendances et les variabilités pluviométriques, dans le bassin versant. L'utilisation des Indices de sécheresse météorologique et la caractérisation spatiale des précipitations (**Cartographie des indices pluviométriques**).

Les résultats indiquaient des fluctuations des précipitations, sont caractérisés par une alternance, de la phase sèche dans les décennies (**70s, 80s**), et le début des années (**90s**), et d'une nouvelle phase humide au milieu des années (**1990s et 2000**).

L'historique des séries pluviométriques indique un véritable décalage. La variabilité de ces paramètres climatiques a eu des conséquences néfastes sur le bilan hydrologique. Cependant, cette sécheresse et suivie par une tendance à l'augmentation. Tendance croissante, les indices de sécheresse estimés indiquaient que le bassin versant de Seybouse a connu une longue période de sécheresse avec une gravité modérée, suivie d'une longue période d'humidité dans la majorité de la zone d'étude. En outre, l'interpolation des indices de précipitations normalisés (**SPI**) sur l'ensemble du bassin de Seybouse dans les **SIG**, a permis de visualiser et d'évaluer le rapport spatial évolution temporaire de la sécheresse, dans la région qui devrait aider les décideurs dans la gestion des ressources en eau, de l'agriculture et d'autres activités susceptibles d'être infectées par la sécheresse.

Mots clés :

Variabilité pluviométrique, variabilité climatique, tests statistiques, Sécheresse, Bassin versant Seybouse, Nord-est algérien.

Abstract:

During these last decades, climate change that has amplified extreme hydrological events (**Torrential rains, floods, droughts...**), and the problem of climate change have been recognized as one of the major developmental issues at the local and regional level, and even at the International scale. Climate change has produced periods of drought, which is characterized by deficit rainfall, and very weak flows of the main catchment areas, surface water resources and consequently stored volumes undergoing a decrease. The water issue is a continuing challenge for countries bordering the Mediterranean, West Africa in general and Algeria in particular. The demand is constantly increasing.

This study aims to characterize the climate variability in Algeria Northeast, precisely in the Seybouse Basin the study site. For this, various climatic data over periods ranging from **(42)** years, this study was based on rainfall series of **(13)** stations, Rainfall and hydrometric stations that are distributed over the studied surface.

In this framework, we propose to study the spatial and temporal variability of the annual rainfall regime. First, we will analyze the magnitude of the absolute variability, relating to annual totals,

To highlight regional and characteristic contrasts in the intensity of annual structural variability. Second, we will study the temporal evolution of annual precipitation. At the end, an analysis of the variability of rainfall trends, different statistical tests were used: (**Sen slope estimation test, Mann-Kendall test, Mann Kandell sequential test and Pettit test**), to evaluate the magnitude of the trend, to identify and determine the dates of trends, And to locate temporal breaks and climate change.

The second axis, is the characterization of meteorological drought and variability in a spatial and temporal scale, The aim is to analyze and map trends and rainfall variability, In the catchment area. The use of Meteorological Drought Indices and the spatial characterization of precipitation, (**Mapping rainfall indices**).

The results indicate fluctuations in precipitation, is characterized by alternation, of the dry phase in the decades **(70s, 80s)**, and the beginning of the **(90s)** years, and a new wet phase in the **mid-90s and 2000**.

The history of the rainfall series indicates a real shift. The variability of these climatic parameters had negative consequences on the water balance. However, this drought and followed by a tendency to increase. Growing trend, estimated drought indices, Indicate that the Seybouse watershed has experienced a long period of drought, with moderate severity, followed by a long period of humidity in the majority of the study area.

In addition, the interpolation of standardized precipitation indices (**SPI**) over the entire Seybouse basin in **GIS**, Has allowed to visualize and evaluate the spatial relationship temporarily changing drought, in the region that should help decision-makers in the management of water resources, Agriculture and other activities likely to be infected by drought.

Keywords: ,Rainfall variability, climate variability, statistical tests, Drought, Seybouse watershed, Northeast Algeria.

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Résumé

Table des matières.....	1-3
Liste des tableaux	4
Liste des figures	5-6
Introduction générale.....	7-9
1. Introduction	7
2. Objectifs et plan de l'étude.....	7-9
2.1Objectifs	7-8
2.2Plan d'étude	9
Chapitre 1 Synthèse bibliographique.....	10-20
1.1 Introduction.....	10
1.2 Changement climatique.....	10-16
1.3 Sécheresse.....	16-18
1.4 Sécheresse en Algérie.....	18-20
Chapitre 2 : Notions sur le Changement climatiques.....	21-36
2.1Introduction	21
2.2 Climats du Monde.....	21
2.3 Classification des climats	21-25
2.4 Le climat de l'Algérie.....	25-30
2.5 Changement climatique a l'echelle globale	30-35
2.6 Le réchauffement climatique dans le monde	36
2.7 Variabilité pluviométrique.....	36-37

Table des matières

2.8 Tendances pluviométriques	37
Chapitre 3 : Présentation la zone d'étude et collecte des données.....	38-58
 3.1 Présentation du site d'étude.....	38-48
 3.1.1 Situation géographique	38-40
 3.1.2 Aperçu topographique	40-41
 3.1.3 Géologique	41-43
 3.1.4 Climat	44-45
 3.1.5 Les zones bioclimatiques	45-46
 3.1.6 Réseau hydrographique bassin de la Seybouse	46-49
 3.2 Présentation des données	49-58
 3.2.1 Description de la base de données	49-51
 3.2.2 Etude d'homogénéité des séries.....	51-52
 3.2.3 Tests graphiques	52-53
 3.2.4 Tests numériques	53-58
Chapitre 4 : Présentation étude des caractéristiques des pluies et caractérisation de la sécheresse.....	59-91
 4.1 PARTIE 1 : étude des caractéristiques des pluies.....	59-78
 4.1.1 Approches statistiques et analyses des séries pluviométriques	59-60
 4.1.2 La variabilité absolue des pluies annuelles	60-61
 4.1.3 La variabilité relative des pluies annuelles.....	61-62
 4.1.4 Évolution temporelle des précipitations annuelles	62-64
 4.1.5 Variabilité et tendances pluviométriques	65
 4.1.6 Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles	65
 4.1.6.1 Test de Pettitt	65-66
 4.1.6.2 Statistique U de Buishand.....	66

Table des matières

4.1.6.3 Résultats	66-69
4.1.7 Tendances des précipitations annuelles.....	69-71
4.1.7.1 test de Mann Kendall.....	69-70
4.1.7.2 SEN'S SLOPE ESTIMATOR.....	71
4.1.7.3 Résultats	71-77
4.1.7.4 Conclusion	77
4.2 Partie 2 : Caractérisation de la sécheresse météorologique.....	78-91
4.2.1 Définition de la sécheresse.....	78
4.2.2 Types de sécheresse	78-79
4.2.2.1 La sécheresse agriculture.....	78
4.2.2.2 La sécheresse météorologie.....	78
4.2.2.3 La sécheresse hydrologie.....	78-79
4.2.3 Indices de sécheresse météorologique utilisés	79-81
4.2.3.1 Rapport à la normale des précipitations (RN)	79
4.2.3.2 Indice de l'écart à la normale (En)	79
4.2.3.3 Indice standardisé de précipitation(SPI)	79-80
4.2.3.4 Résultats et analyse	81-85
4.2.4 Cartographie de la variabilité pluviométrique annuelle	85-90
4.2.5 CONCLUSION	90-91
Conclusion générale	92-93
Références bibliographiques.....	93-103
Annexe.....	104

Liste des tableaux

Table .1 : stations pluviométriques retenues pour l'étude.....	50
Table .2: les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des 13 stations du bassin hydrographique de Seybouse.	57
Table. 3: caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles.	62
Table.4 : principal dates de rupture des séries pluviométriques.....	68
Table 5: Application du test de Mann Kendall pour les pluies annuelles au seuil de 95% (=0.05)	72
Table.6 : Classification de la sécheresse selon SPI.....	80
Table.7 : Seuils de sécheresse correspondants aux différents indices au cours de la période 1970-2011.	81
Table.8 : les caractéristiques des différentes périodes de l'indice Standardisé des Précipitations (SPI) sur la période (1970 2011).	83

Liste des figures

Fig. 1 : Carte simplifiée des climats mondiaux.....	22
Fig. 2: carte de régions climatiques des 4 zones.....	26
Fig. 3: carte de températures min max de la station Alger port	27
Fig. 4: carte de températures min max de la station chlef.....	27
Fig. 5: carte de températures min max de la station djelfa.....	28
Fig. 6: carte de températures min max de la station Ghardaia.....	29
Fig. 7: carte de températures min max de la station Adrar.....	29
Fig. 8: carte de températures min max	30
Fig.9 : Résume des résultats des 21 modèles globaux du GIEC sur le changement de la température de surface, des précipitations et de certains extrêmes pour la zone méditerranéenne.....	33
Fig. 10: Comportement moyen des 21 modelés globaux du GIEC concernant le changement de température et de précipitations pour l'Europe pour le scenario A1B.	34
Fig. 11: Changements de précipitations sur la zone euro-méditerranéenne pour les 21 modelés globaux du GIEC et pour la moyenne des modèles (montrée en bas à droite (MEAN)) entre les années 1980-1999 et 2080-2099 pour le scenario A1B.....	35
Fig. 12 : Situation du bassin versant de l'Oued Seybouse.....	39
Fig13 : Carte géologique du bassin versant de la Seybouse.....	43
Fig.14 :Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien	44
Fig. 15 :Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien.....	46
Fig.16 : carte de réseau hydrographique bassin de la Seybouse.....	47
Fig.17:Profil en long de l'Oued Seybouse.....	48
Fig.18: Localisation des stations météorologiques dans la région d'étude.....	51
Fig.19: Le contrôle des totaux annuels des précipitations par la méthode des doubles cumuls.....	55
Fig. 20 : Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué aux station.....	57

Liste des figures

Fig.21 : Répartition spatiale de la variabilité absolue des pluies annuelles.....	61
Fig.22 : Évolution des précipitations annuelles dans les stations climatiques au cours de différentes périodes.	63-64
Fig.23 : Test de Pettitt. Dans ce graphique, nous voyons une pause dans la série (El Kerma , Mechroha , Pont Bouchet,Ain Berda et d'Bordj Sabath)	67-68
Fig.24 : Tendance à la hausse des précipitations moyennes annuelles dans 13 stations (nord l'Est algérien), période (1970-2011).	73-77
Fig.25 : Fréquence des années sèches, normales et humides de treize stations pluviométriques au cours de la période 1970-2011.	82
Fig.26: Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de treize stations pluviométriques sur la période 970-2011.	84-85
Fig.27:Répartition spatiale des valeurs moyennes de l'ISP sur différentes périodes.....	88-90

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

1. Introduction :

La problématique des changements climatiques il a été considéré l'un des problèmes majeurs du développement à l'échelle locale et régionale voire même à l'échelle international. Les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures contemporaines. Le changement climatique est un phénomène qu'il a et fait encore largement parler de lui compte tenu des fluctuations qui touchent le climat terrestre, et leur conséquence sur le mode de vie de l'humanité

La communauté scientifique internationale s'est beaucoup intéressée à l'étude de ce cycle. La principale problématique qui en est ressortie réside dans la variabilité climatique et au changement climatique. Dans plusieurs régions du globe, les événements météorologiques extrêmes sont devenus de plus en plus fréquents et de plus en plus répandus. Cela a rappelé à la communauté scientifique internationale une évidence première: le climat de notre planète est très variable dans le temps et dans l'espace. Dans cette optique, l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Groupe Intergouvernemental des experts du climat (GIEC) estiment qu'il est nécessaire actuellement ,d'entreprendre des études de diagnostic pour déterminer empiriquement et statistiquement les caractéristiques du système climatique et sa variabilité pour différentes régions du globe

La région méditerranéenne fait partie des régions les plus sensibles à cette variabilité particulièrement sa rive sud qui est considérée comme très vulnérable. En effet, à l'Algérie et aux autres pays du Maghreb, la variabilité de la disponibilité des ressources en eau n'est pas récente. Mais ces dernières années, la sécheresse s'est manifestée d'une manière préoccupante, sévère, persistante et avec une intensité remarquable.

2. Objectifs et plan de l'étude

2.1Objectifs :

Objectifs du présent travail consiste principalement à étudier la variabilité climatique dans le bassin versant de l'Oued Seybouse ; La variabilité des pluies et la caractérisation de la sécheresse météorologique pour l'identification des tendances internes et secondaires et enfin de réaliser les cartes des précipitations, pour la période de 1970 à 2011.

INTRODUCTION GENERALE

Nous avons, ainsi, entrepris une étude très détaillée du régime pluviométrique sur le territoire du bassin Seybouse pour l'objectif scientifique suivant :

Déterminer la variabilité spatio-temporelle des pluies et analyses des séries pluviométriques. L'Évolution temporelle des précipitations annuelle.

Analyse de la variabilité climatique particulièrement pluviométrique par des techniques usuelles de détection des ruptures et des tendances dans les séries de pluie.

Déterminer comment se manifeste la sécheresse selon son intensité, sa durée, sa situation chronologique et ses seuils critique.

Caractérisation la sécheresse et spatiale des précipitations d'identifier les tendances internes et secondaires et enfin de réactualiser la carte des précipitations (Cartographie des indices pluviométriques).

2.2 Plan d'étude :

La thèse est structurée en quatre chapitres :

Premier chapitre : propose une synthèse bibliographique sur la variabilité, le changement climatique et la sécheresse d'un régime pluviométrique dans le monde, la méditerranée et l'Algérie. Nous y résumons les principales conclusions des nombreuses études ayant traité cette thématique.

Deuxièmes chapitres comporte deux parties :

Une première partie qui présente les données de base avec un aperçu sur le climat et la géologie de la zone d'étude.

Une deuxième partie qui est consacrée à l'étude de la base de données. L'étude de l'homogénéité des séries pluviométriques, de sa régionalisation par l'analyse en composante principale.

Troisième chapitre : définitions et rappels concernant le changement climatique et à la variabilité climatique

Quatrième chapitre comporte deux partis:

Première partie consiste à une étude et une analyse de la variabilité climatique particulièrement pluviométrique par des techniques de détection des ruptures et des

INTRODUCTION GENERALE

tendances dans les séries des pluies prises en compte de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelle.

Deuxième partie détaille les résultats de l'application de l'indice pluviométrique standardisé pour la caractérisation de la sécheresse climatique, la réactualisation de la carte des précipitations.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

1.1 Introduction :

Au cours de la dernière décennie, le changement climatique a été toujours reconnu comme l'un des problèmes majeurs à l'échelle locale, régionale et même sur l'échelle internationale. Terre d'Afrique et située sur le rivage de la Méditerranée qui vit éclore de nombreuses civilisations, l'Algérie a subi tantôt l'influence de l'Asie et tantôt celle de l'Europe. Comme une conséquence de ses caractéristiques géographiques et économiques, l'Algérie entretient des liens privilégiés avec les pays du Maghreb, de l'Afrique et de la Méditerranée. L'Algérie est l'un des plus grands pays d'Afrique (zones arides et semi-arides) qui sont vulnérables et souffrent de sécheresses chroniques. Ce qui entraîne de forts déficits hydriques qui représentent une forte contrainte sur l'environnement, les activités socio-économiques et le bien-être des populations et intensifient inexorablement le phénomène de désertification qui affecte déjà gravement le pays. Le milieu naturel subit une forte dégradation : la déforestation, l'érosion des sols, la baisse de la qualité des terres agricoles et des parcours, la diminution quantitative et qualitative des ressources en eau, la dégradation des écosystèmes et l'assèchement des oueds. Les régions les plus touchées en Algérie sont les Hauts Plateaux et la Steppe. Celles-ci constituent des zones de transition entre le nord et le sud du pays et couvrent environ 70 % des terres viables du nord. Elles constituent de véritables potentiels agricoles et assurent la sécurité alimentaire du pays. Les changements climatiques peuvent constituer un facteur aggravant de la dégradation de ses régions.

Il y a quelques dizaines d'années, la communauté scientifique internationale tirait la sonnette d'alarme au sujet des impacts des activités humaines sur l'équilibre du climat (GIEC).

Le fait que plusieurs changements résultants sont déjà perceptibles aux échelles continentales et régionales et ont concerné différents aspects du climat dont les événements extrêmes (IPCC, 2007)

1.2 Changement climatique :

Pour faire face à ce danger, les hommes ont essayé d'apprécier le phénomène en essayant de comprendre les cycles climatiques en étudiant la variabilité et les tendances de différentes variables climatiques, notamment les précipitations et les températures. [NICHOLSON 1989; VINKOV et coll., 1990; BALLING et al. 1998; ZHAI et al. 2003; II, GAUTAM 2016]

L'étude du climat a toujours intéressé l'homme puisqu'elle en affecte considérablement les conditions de vie et induit des réponses biologiques et écologiques de la faune et de la flore à travers le monde (Root et al, 2003). L'influence du climat sur l'homme s'effectue à plusieurs domaines : ressources en eau, agriculture, sécurité alimentaire, santé, hygiène, stabilité ...etc.

Aux échelles plus locales, son influence peut être masquée par d'autres facteurs tels que les facteurs édaphiques ou biotiques (Pearson et Dawson, 2003).

La compréhension des grands mécanismes du climat est à l'évidence, un enjeu majeur pour le monde scientifique. Depuis la fin du XIXème siècle, le climat du globe est affecté par un réchauffement à grande échelle qui ne touche pas de la même manière les deux hémisphères. L'hémisphère nord se réchauffant plus lentement que l'hémisphère sud (GIEC, 2007). Cette évolution différentielle des températures entre les deux hémisphères est liée à la baisse des cumuls pluviométriques dans les régions subtropicales de l'hémisphère nord, observée depuis les années 70 (Flageollet, 2012).

L'évolution de la pluviométrie mondiale est beaucoup plus contrastée, puisqu'elle est soumise à une forte variabilité spatio-temporelle. Malgré ce constat et compte tenu de l'augmentation des températures, une hausse probable des précipitations est attendue. En effet, l'accélération du cycle hydrologique sous l'effet des fortes températures pourrait entraîner plus de précipitations et d'évaporation (OMM, 2013).

Certaines études montrent que ce changement se traduit par une intensification des pluies et une récurrence des événements extrêmes (plus perceptible sur les dernières décennies 1991-2010) (OMM, 2013) (New et al, 2001 ; Christensen et al, 2007).

Il faut remarquer qu'on ne pouvait pas, il y a seulement dix ans, être aussi franc et aussi tranché dans la description des changements climatiques et de la hausse des températures. (Najib Saab, 2009).

Les changements du cycle hydrologique global lors des dernières décennies ont été associés, au réchauffement observé : hausse du contenu atmosphérique en vapeur d'eau, changement des précipitations, réduction de la couverture neigeuse et fonte des glaciers, changement de l'humidité des sols et du ruissellement. Les simulations des modèles climatiques sur le XXI^e siècle s'accordent sur une hausse très probable des précipitations aux hautes latitudes, sur une partie des tropiques, et une réduction dans certaines zones subtropicales et de moyennes latitudes. Des réductions importantes pourraient se produire, allant jusqu'à 20%, dans la région méditerranéenne, les Caraïbes et les côtes Ouest subtropicales de chaque continent. À partir du milieu du XXI^e siècle, le ruissellement moyen annuel des cours d'eau et la disponibilité en eau augmenteraient dans les hautes latitudes et dans certaines régions humides tropicales, et diminuerait dans les régions sèches aux latitudes moyennes et dans les zones sèches des tropiques (Bates et al, 2008).

Au niveau de la région méditerranéenne, le réchauffement devrait être plus rapide que pour les régions avoisinantes. Ainsi, en Europe, au cours du XX^e siècle, la température a

augmenté de 0.8 °C avec des différences régionales importantes. La hausse est surtout sensible avant 1940 et après 1970. Elle est particulièrement sensible en Europe du Sud et au niveau du bassin méditerranéen, avec près de 2 °C au Sud-Ouest de l'Europe et très net au niveau de l'Afrique du Nord, même si elle est difficilement quantifiable en raison de manque de données d'observations. Pendant les années 1980 et 1990, le réchauffement a été plus prononcé au niveau du bassin méditerranéen, avec une hausse plus importante en hiver, surtout en ce qui concerne les températures minimales. Ainsi, l'amplitude du cycle diurne a diminué.

L'Europe est généralement caractérisée par trois différents types de climat:

Climat océanique doux et humide en bordure de l'océan Atlantique, climat continental aux longs hivers froids au centre et à l'EST du continent et le climat méditerranéen aux étés chauds et secs. Plus localement, l'Europe possède une multitude de climats régionaux dus à la présence du relief complexe (surtout au sud du continent), de plusieurs mers intérieures et d'autres facteurs formant des particularités climatiques. Les régimes de température et de précipitations peuvent ainsi varier beaucoup d'un endroit à l'autre même à relativement faible distance. Cette variabilité spatiale est particulièrement forte pour les événements extrêmes surtout en matière de précipitations. La variabilité temporelle (journalière, saisonnière ou interannuelle) des variables climatiques est également très importante, néanmoins le régime climatique d'un lieu donné a ses propres caractéristiques assez bien dénies et souvent stables dans le temps à l'échelle de quelques décennies (Sauquet et al, 2006).

Le XXe siècle est marqué par l'agroclimatique pour le centre-ouest français le réchauffement climatique contemporain caractéristique. La température moyenne annuelle depuis le milieu du XXe siècle indique une nette tendance au réchauffement depuis la fin des années 80 .le test statistique de Pettitt signale une rupture climatique en 1987 communes à toutes les stations, à l'exception de Nantes où le changement de tendance a lieu plutôt, en 1980.La température moyenne annuelle a ainsi augmenté de 0,7° C (Poitiers) à 1,2° C (Châteauroux et Le Mans).

L'étude statistique de séries climatiques ou de donné indirecte montre que les Alpes européennes ont déjà enregistré une hausse d'environ 2° C entre la fin du 19e et le début du 21e siècle, soit deux fois le taux de réchauffement mesuré à l'échelle nord hémisphérique (Auer et al, 2007)

Les effets de la NAO sur le cycle hydrologique ont été largement étudiés en Europe, sur les Britanniques (Wilby, 2001), la Scandinavie (Cherry et al, 2005) ou sur la péninsule ibérique

(Trigo et al, 2004). Les effets de la NAO l'oscillation nord-atlantique en France sont plus compliqués à appréhender, les effets pouvant être très différents entre le sud et le nord du pays .La NAO n'en reste pas moins une source importante de variabilité du climat en France (Plaut et al, 2001; Sanchez-Gomez et Terray, 2005),

Le Quatrième Rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) conclut, sur la base des faits observés, que de nombreux systèmes naturels sont touchés par des changements climatiques régionaux, particulièrement par des augmentations de température. Le réchauffement du climat est révélé par les changements concernant le niveau de la mer, la couverture neigeuse, la super Cie des glaciers et les précipitations. Les changements climatiques ont également eu des incidences importantes sur le système socio-économique. En fait, notre vulnérabilité aux phénomènes climatiques s'accroît avec l'augmentation des populations, l'urbanisation et notre dépendance croissante aux infrastructures de transport, de communication et de distribution d'énergie, dans ce contexte la région de l'Europe et du bassin Méditerranéen est particulièrement sensible aux variations et changements du climat.

De nombreuses études sur la variabilité climatique à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest (Nicholson, 1994 ; Servat et al, 1998 ; Paturel et al, 1998 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoïn et al, 2003) et de la Côte d'Ivoire (Brou, 1997 ; Bigot et al, 2005), montrent qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée à partir de la fin de la décennie 1960. Ce phénomène ne s'est pas réalisé de façon homogène dans le temps. En Côte d'Ivoire, il a d'abord affecté le nord, puis progressivement c'est étendu vers le centre et enfin sur le littoral. Ces anomalies pluviométriques constatées depuis près de quatre décennies ont connu une résonance exceptionnelle dans les régions nord et centre du pays. Mais en réalité, l'ensemble du pays présente une vulnérabilité importante aux déficits pluviométriques. En effet, on note durant ces mêmes moments, des déficits pluviométriques dans les régions même plus humides situées dans le Sud (Brou, 1997 ; Brou et al, 1998) et l'ouest (Savané et al, 2001 ; Kouassi, 2003) où l'importance des hauteurs pluviométriques fait que les effets de la baisse des précipitations sont moins ressentis.

Sur la Rive Sud du bassin méditerranéen, l'augmentation des températures est conforme à la situation mondiale. La hausse des températures minimales (Tn) est cependant plus nette dans cette partie de l'Afrique du Nord (Nouaceur et al, 2013 ; Donat et al, 2013)

Ainsi, à l'échale du Maghreb, le climat a connu un changement brutal à partir de 1973, date qui a coïncidé avec la sécheresse du Sahel (Tabet Aoul, 2011).Depuis 1973, on constate :

- une occurrence plus grande des sécheresses : une année sur trois
- une intensification des inondations : 1990 en Tunisie, 2001 en Algérie et en 2002 au Maroc
- un nombre croissant de vagues de chaleur en toutes saisons
- des feux de forêt (perte annuelle de 25000 ha/an en Algérie et au Maroc)
- une élévation du niveau de la mer

L'IPCC affirme que les changements récents de la température a eu des impacts discernables sur l'environnement naturel (rétrécissement des glaciers, fonte du permafrost, floraison précoce des arbres). Une évidence une augmentation récente de la fréquence des sécheresses et des inondations (IPCC, 2001).

Selon le dernier rapport de l'IPCC (2012), le réchauffement global provoquera l'augmentation d'événements climatiques extrêmes et touchera les populations avec une vulnérabilité croissante au fil du temps (Gregory, 1975). Par ailleurs, la présence de plus en plus fréquente de sécheresses, d'inondations ou ouragans, a rendu très actuel l'approfondissement de l'étude du climat et ses variations, et incite la communauté scientifique à intensifier ses efforts afin d'identifier les changements à l'échelle globale (OMM, 2007).

À l'échelle des ères géologiques, les avancées en matière de paléoclimatologie ainsi que les reconstitutions de plus en plus précises de la coévolution entre le climat et le couvert végétal dans les basses latitudes, ont stimulé les recherches sur les interactions entre les processus de surface et le climat régional. L'un des effets le plus remarqués étant l'élévation de la température moyenne du globe depuis la deuxième moitié du 20ème siècle (Cantat, 1995; Nicholls et al, 1996 ; Parker et al, 2000).

Depuis quelques années les débats scientifiques sur le climat se focalisent beaucoup plus sur le réchauffement climatique actuel et ses conséquences environnementales (Duplessy, 2001). En 1995, l'IPCC a émis la certitude que les activités anthropogéniques ont influencé considérablement les changements globaux. Plusieurs auteurs (Crisci et al, 2002) attribuent le réchauffement terrestre à l'accentuation de l'effet de serre et suggèrent que cette tendance continuera aussi dans le futur.

Il convient de noter qu'il existe un découpage, qui est à la base des travaux consacrés à la recherche de la valeur du réchauffement global, à savoir un découpage des espaces terrestres et océaniques selon un maillage géométrique (Dessai, 2003; Mitchell et Jones, 2005). Parmi les résolutions communes aux études effectuées par la communauté scientifique (GIEC, 2008), il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre

plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point (WMO, 1966; Lubès et al, 1994; et Cavadias., 1994).

Ces dernières années, plusieurs études sur les variations climatiques ont été réalisées en analysant l'évolution de la pluviométrie dans diverses parties du globe et à différentes échelles temporelles; Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence (Salinger, 1980 ; Jones et al, 2008). Citons l'exemple de (Moonen et al, 2002).

Les résultats de risques du changement climatique en Italie leur indiquent une tendance à la hausse des températures et une baisse de la pluviométrie. Ils ont utilisé les paramètres climatiques classiques (températures, événements d'averses, évaporation), et ont évalué le risque de sécheresse et les tendances temporelles pour toutes les variables en utilisant les techniques de régression linéaires (Maheras ,1981) et (Wigley et al ,1984)

Ses conséquences peuvent être désastreuses même dans les pays très développés. Par exemple, la sécheresse de 1988 a causé aux États-Unis et au Canada des dégâts estimés respectivement à 40 milliards de dollars américains et 1.8 milliard de dollars canadiens BARKAT T. (1998).

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne, beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydropluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté une diminution du nombre de jours de pluie et la pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1998; Paturel et al ,1995; Paturel. et al, 1997; Tarhule Aondover et al, 1998; Moron Vincent, 1994 ; Servat et al, 1999 ,Servat et al , 1997; Houndénou et Hernandez, 1998), les études sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, indique une augmentation des températures et une accentuation de la variabilité climatique. (GIEC ,2008).

En Afrique du Nord et au Maghreb, on observe ces dernières années des bouleversements climatiques sans précédent (Stour et al, 2009 ; DMN, 1995), sachant que dans les climats subtropicaux de l'Afrique du Nord-Ouest, les bouleversements sont liés aux caractères très variables des précipitations annuelles et décennales (Jens, 2008).

Par ailleurs, la région méditerranéenne a été identifiée comme un « hot spot » du changement climatique, c'est-à-dire une région particulièrement vulnérable où les changements seront marqués en termes d'élévation des températures et de diminution des précipitations moyennes, de variabilité interannuelle et d'événements météorologiques extrêmes

(Douguédroit et Nourant, 2003 ; Piervitali et Colacino, 2003). De plus, divisée entre trois continents, abritant 7,4 % de la population mondiale et devant faire face à une forte disparité de la répartition des ressources en eau, la région méditerranéenne présente des enjeux scientifiques, environnementaux et socio-économiques importants. D'autre part, vers la fin des années 1970, la rive sud-méditerranéenne a connu des épisodes prolongés de sécheresses qui ont incité de nombreux scientifiques à étudier les causes possibles (Bouqdaoui et al, 2006 ; Nicholson et Wigley, 1984).

Il est à constater aussi que, l'IPPC (2007) a annoncé dans son rapport que le changement climatique se traduirait entre autres par une modification des régimes pluviométriques à l'échelle mondiale et régionale, et entraînera le déplacement des zones climatiques. Or, dans les pays méditerranéens, situés en zone subtropicale semi-aride, la pluviométrie est le paramètre climatique dominant (Chaumont, 1971), étant d'une part généralement insuffisante, et d'autre part beaucoup plus variable que la température.

Au cours des années 70, 80, 90 et 2000, plusieurs chercheurs ont montré qu'après les années 70, les précipitations ont significativement baissé en Afrique du Nord (Meddi et al, 2009 ; Sebbar et al, 2012).

1.3 Sécheresse :

Généralement, la sécheresse est apparue dans la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80. Étudié aussi l'évolution pluviométrique par rapport à l'indice de normalité sur quelques pays méditerranéens (Italie, Algérie, France, Grèce, Espagne Maroc, Portugal et Moyen-Orient) (Kadi ,1995)

Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson et al, 1997). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson et al, 1997) depuis 1900, plusieurs indices ont été développés pour identifier et évaluer la sévérité de la sécheresse, tels que l'Indice d'anomalie des pluviosités (RAI) (VAN ROOY, 1965), l'Indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (PALMER, 1965) et l'Indice de précipitation standardisé (SPI) (MCKEE et al, 1993), cette dernière est recommandée par de nombreuses organisations comme l'organisation météorologique mondiale (OMM) et l'Administration nationale des océans et de l'atmosphère des États-Unis (NOAA) pour caractériser les sécheresses météorologiques ainsi que les autres catégories de sécheresses (ELSA E. MOREIRA et Al,2016) en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa souplesse pour l'analyse de la sécheresse, car elle peut être utilisée à différentes échelles de temps (par exemple, hebdomadaire, mensuelle, annuelle

...) [Hayes et al, 1999].

La tendance générale des températures à l'échelle mondiale est à la hausse, ce scénario pourrait favoriser dans certaines régions une augmentation des précipitations (GIEC, 2007). Les pluies enregistrées dans les pays du Maghreb témoignent aussi de l'intensification des cycles climatiques (Medjerab, 2005). Ainsi, après les longues sécheresses observées au cours des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée dans toute la région. Les signes des changements s'avèrent encore plus significatifs avec les records de pluviométrie enregistrés pour l'année agricole 2008/2009 dans la sous-région maghrébine (Maroc – Algérie). Qualifiées d'exceptionnelles et historiques par les services météorologiques des pays concernés, les pluies ont généreusement réalimenté les nappes phréatiques (Janati et Hanchane, 2011) portant la marge de sécurité hydrique à près de deux années en eau potable et en eau destinée à l'irrigation. Le remplissage des barrages est lui aussi sans précédent. Ainsi, certains barrages ont atteint près de 70 % en Algérie.

En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse grave en Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes. Au sud de l'Afghanistan, la population entière (300 000 familles) du désert du Registan a fui lorsque leurs sources d'eau se sont asséchées. Au Pakistan, la sécheresse dans les provinces du Baloutchistan et du Sindh a été signalée comme étant l'une des pires de l'histoire du pays. En Iran, 18 des comtés et 28 provinces ont été confrontés également à une sécheresse grave. Le Tigre et l'Euphrate en Iraq ont également connu une baisse de leur niveau pour atteindre environ 20% de leur débit moyen (The Nation, 2000).

Pour Suite à une analyse d'un indice des précipitations annuelles au Sahel Ouest africain, que la sécheresse n'est pas encore terminée en fin de l'année 2000. (L'Hôte et al, 2002), cependant, les modifications climatiques subies par l'Afrique durant le XXème siècle sont très nombreuses et n'ont pas les mêmes emprises (Paturel et al, 2004).

Le siècle dernier en Afrique a été marqué par un phénomène de sécheresse qui a touché de nombreux comtés et a causé une perte économique colossale (SIRCOULON, 1976; OBA et al, 1987)

Le test de PETTIT a été largement utilisé pour détecter les points de changement dans les séries temporelles météorologiques et hydrologiques observées (TAXAK et al, 2014). La rupture montre que la région de Grand-Lahou s'inscrit globalement dans la fluctuation du régime pluviométrique observée entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale (Olivry, 1997 ; Paturel et al, 1997,1998 ; Servat et al, 1998

et 1999).

Tout comme l'Afrique d'ouest et centrale, les pays d'Afrique du Nord n'échappent pas non plus à cette variabilité climatique. Les travaux sur la Tunisie dans le même ordre d'idée (Kingumbi et al, 2006) ont mis en évidence une baisse significative (sans rupture de stationnarité des séries) des précipitations annuelles en Tunisie centrale, entre 1976 et 1989.

Une étude de la sécheresse météorologique et hydrologique dans la région de Siliana en Tunisie a été effectuée en se basant sur plusieurs indices (Bergaoui et Alouini, 2001). Les résultats obtenus montrent que la méthode des écarts à la moyenne donne un pourcentage de 60 % d'années sèches. L'analyse fréquentielle révèle que la sécheresse est de classe modérée (35 %). La fréquence d'apparition d'années successives sèches est relativement élevée : 55 % d'années sèches sont formées de deux, trois ou cinq années sèches consécutives. Quant à la sécheresse hydrologique, elle est plus accentuée, prouvant la dissymétrie des apports et la tendance générale des phénomènes hydrologiques à la faible hydraulité. Simultanément, l'auteur prouve que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23 à 40 % suivant une croissance du sud-ouest au nord-ouest. (Bergaoui, 1983).

Les études effectuées sur la pluviométrie et les apports de l'oued Merguelil ont connu une baisse assez significative ces dernières décennies (Kingumbi, 2006), et l'année 1988-1989 est aussi apparue dans plusieurs variables comme une année de rupture (Bergaoui et al, 2001; Kingumbi, 2006; Lahache et Pillet, 2008).

1.4 Sécheresse en Algérie :

Plusieurs travaux sur la pluviométrie de l'Algérie ont été menés depuis le dernier siècle, mais la plupart d'entre eux en font une analyse superficielle sur quelques stations en se basant sur le calcul de la moyenne. Ce n'est qu'en 1946 grâce aux travaux de Seltzer sur le climat de l'Algérie qu'une analyse détaillée sur la pluviométrie est établie.

En Algérie, en considérant les stations du nord (Demmak et al(1994) par une méthode comparative des moyennes(1974/1992 par rapport à celle de Chaumont 1913/1963) et à la moyenne de longue durée (1922/1992), on constate que l'ampleur du déficit pluviométrique de la dernière période 1974/1992 s'intensifie d'est en ouest. ils mettent en évidence la tendance à la sécheresse des vingt dernières années et font apparaître des sécheresses analogues durant les années 1913 et 1940.

Farmer et Wigly (selon Kadi 1992) donnent l'évolution d'un indice de sévérité de la sécheresse sur la même région et relèvent l'occurrence de sécheresse sévère et généralisés

durant des années très isolées : 1937, 1961, 1970.

Dans l'étude des données pluviométriques de 120 stations algériennes, dont le nord, les séquences humides et sèches en alternance ; (I) une longue séquence humide de 1922 à 1938 caractérisée par un excès de pluie d'environ 6%. II) Une séquence sèche de 1939 à 1946 dans l'est et le centre de l'Algérie avec un déficit pluviométrique d'environ 11%. (III) Une séquence humide de 1947 à 1972. (IV) et une longue séquence sèche qui commence à partir de 1973. (LABORDE ,1993)

L'application d'une analyse en composantes principales avec rotation Varimax sur deux réseaux et sur deux périodes différentes ; ils ont abouti à une division régionale de l'Ouest algérien pour une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie. Les auteurs ont remarqué que la sécheresse des années 40 est principalement due à une baisse de pluie de printemps et que celles des années 80 à une baisse de pluie d'hiver. (Matari et Douguédroit ,1993)

L'étude sur la sécheresse a constaté qu'un déficit pluviométrique apparaît à partir de 1970, et persiste encore actuellement. Ce déficit génère un grave problème d'ordre économique et social, compte tenu de la pression croissante qui exerce sur la ressource en eau (alimentation en eau potable, irrigation....). (Meddi et Humbert ,2000),

L'étudié de la sécheresse sur les stations pluviométriques du Nord-ouest algérien. À partir des variables centrées réduites des totaux annuels, l'analyse a mis en évidence la succession de deux phases, un long épisode globalement pluvieux qui s'est étendu entre le début des années 50 et la fin des années 70, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 80 et qui persiste jusqu'à son étude ; les pluies d'hiver durant la décennie 1990-2000 ont connu généralement une baisse pour les stations d'études ;(Khaldi, 2005) Les résultats obtenus par l'étude de la sévérité de la sécheresse, en utilisant différentes méthodes comme celles des quintiles et des Terciles confirment la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les deux décennies 1980-1990-2000 pour la région d'étude ; L'analyse de l'étude de la relation entre l'ONA et la pluviométrie à partir de la corrélation montre qu'il y a un lien entre cette oscillation et la pluviométrie dans cette région d'étude.

D'autres études menées sur la sécheresse en Algérie montrent que, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'ouest et du Centre se sont asséchés. Ceci est moins ressenti à l'est de l'Algérie. C'est ainsi que la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus difficile à gérer. L'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie. À noter un déficit d'environ 50% dans les régions centrales de l'Algérie des précipitations, alors qu'il vient jusqu'à 30% dans l'Ouest et les parties orientales. (Khettab et al, 2002)

Le nord-ouest de l'Algérie a connu dans les deux dernières décennies une sécheresse sévère caractérisée par des déficits pluviométriques variant de 12% à 20%. (MEDJERAB et al, 2005)

Les cours d'eau de l'Est algérien ont connu au cours de 1987-1988 la sécheresse hydrologique (faible hydraulité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002. (Mebarkie ,2010).

Mettent en évidence par des études de la sécheresse du nord-est de l'Algérie Diminution pluviométrique au cours des dernières décennies (1970-1980-1990-2000) et diminution débits de la rivière de la Medjerda durant ces mêmes décennies ; augmentation de la température , de l'évapotranspiration et forte intensité de pluies. (Khoualdia et Djebbar, 2014)

Chapitre 2

Notions sur le Changement climatiques

2.1 Introduction :

Le changement climatique est un thème d'actualité au centre des préoccupations de la communauté scientifique à l'échelle mondiale.

Depuis quelques années, plusieurs études ont porté sur les changements planétaires, dont plusieurs se sont attardées sur les sécheresses. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliard de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliard en sont morts de causes directes ou indirectes. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir. L'augmentation de la population humaine qui entraîne une pression accrue sur l'environnement y contribue grandement. Dans plusieurs régions du globe, une pratique agricole non adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinées à la surexploitation, des réserves hydriques accélèrent le processus des sécheresses et entraînent parfois une situation irréversible, la désertification (ONU, 1997; UNCCD, 2004).

2.2 Climats Mondial :

Une mise au point sur le climat du Globe : une mise au point sur la classification du climat, la répartition, les caractéristiques et aussi sans oublier les derniers rapports du GIEC concernant les probable d'évolution.

2.3 Classification des climats :

La classification des climats est fondée d'une part sur la température et d'autre part sur l'importance des précipitations, aussi la latitude, l'influence maritime ou continentale, l'altitude, les vents, les courants marins, la période de l'année permettent de définir les grandes zones climatiques.

Les différents types de climat sont : Équatorial, Mousson, Océanique, Aride, Montagnard, Tropical, Méditerranéen, Chinois, Continental, Polaire comme la montre la figure 01.

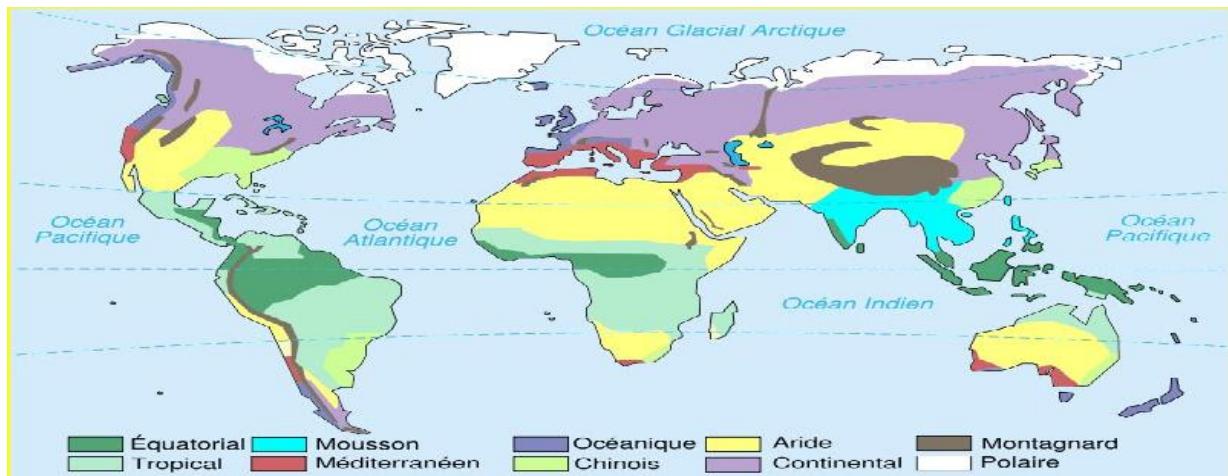


Fig. 1 : Carte simplifiée des climats mondiaux

2.3.1 Le climat équatorial règne sur les basses latitudes. Les rayons du soleil sont proches de la verticale et chauffent donc beaucoup la terre. Le soleil passe au zénith à l'équateur au moment des deux équinoxes de mars et septembre ce qui explique les maxima de température à ces dates.

- Températures : voisines de 25°C
- Amplitude thermique annuelle : environ 2°C
- Précipitations : abondantes de 2000 à 4000 mm par an et fréquentes
- Les saisons : peu marquées
- Végétation : forêt dense
- Exemples de régions à climat équatorial : Amazonie, Congo, Indonésie.

2.3.2 Le climat de mousson est une variante du climat tropical.

- Températures : de 20 à 40°C
- Amplitude thermique annuelle : moyenne
- Précipitations : on passe de la sécheresse à la pluie diluvienne. On peut aller jusqu'à trouver 12000mm d'eau en quatre mois
- Les saisons : trois saisons
- novembre à mars: températures douces (20°C)
- avril à juin: températures très élevées (de 30 à 40°C)
- juillet à octobre: températures élevées (25°C) et pluies très abondantes
- Végétation : forêt dense, savane
- Exemples de régions à climat de mousson : Sud-est asiatique, Inde.

2.3.3 Le climat océanique

- Températures : modérées et peu contrastées : elles s'écartent peu de la moyenne annuelle de 11° C.
- Amplitude thermique annuelle : faible.
- Précipitations : réparties tout au long de l'année (entre 800 et 1000 mm, 2 jours sur 3) avec un maximum en hiver.
- Les saisons : peu marquées : hiver doux , gel et neige rares ; été frais.
- Vents : violents, fréquents et de direction changeante.
- Végétation : forêt à feuilles caduques, lande, prairie.
- Exemples de régions à climat océanique : côte Atlantique de l'Europe, côte Pacifique de l'Amérique du Nord.

2.3.4 Le climat aride on l'appelle également climat tropical sec, ou encore climat désertique.

On le trouve de part et d'autre des tropiques.

- Températures : très élevées (jusqu'à 46°C)
- Amplitude thermique annuelle : forte (36°C) et amplitude thermique diurne également forte
- Précipitations : faibles et irrégulières : de 100 à 400 mm
- Saisons : deux saisons :
- été de 36°C à 46°C, saison sèche
- hiver de 10°C à 15°C, saison humide
- Végétation : rare, steppe
- Exemples de régions à climat tropical sec : Afrique, Australie, Arabie

2.3.5 Le climat montagnard : est un climat propre aux diverses régions de montagne, indépendamment de la zone climatique où elles se situent. Il se caractérise par des hivers froids et des étés frais et humides.

- Températures : la température diminue avec l'altitude (1°C tous les 100 mètres)
- Amplitude thermique annuelle : forte
- Précipitations : importantes, sous forme de neige avec l'altitude
- **Végétation** :

Plus on monte en altitude moins il y a de végétaux. Les végétaux sont « étagés ».

- Le premier étage dit montagnard (de 600 à 1 500 m d'altitude)

On trouve des forêts de pins sylvestres, de sapins et de hêtres...

- Le deuxième étage dit subalpin (de 1 500 à 2 200 m d'altitude)

On trouve des forêts de conifères (mélèze, épicéas, pins...). On trouve aussi des fleurs résistantes (crocus...).

Le Troisième étage dit alpin (de 2 200 à 3 500 m d'altitude)

Il n'y a plus de forêts ni même de buissons. On n'y trouve que des pelouses rocallieuses et des rochers. Il y a toutefois des fleurs qui y poussent (edelweiss, génépi...).

- Le quatrième étage dit nival (plus de 3 500 m d'altitude).

C'est un l'étage des neiges éternelles. Rien de pousse, il n'y a que de la neige, de la glace...

2.3.6 Le climat tropical se retrouve de part et d'autre de la zone équatoriale.

- Températures : élevées et contrastées
- Amplitude thermique annuelle : voisine de 10°C
- Précipitations : variables de 500 à 1500 mm par an
- Les saisons : deux saisons :
 - été - saison fraîche et humide (environ 23°C)
 - hiver - saison chaude et sèche (environ 35°C)
- Vents : permanents : les alizés
- Végétation : forêt moyennement dense et savane selon l'humidité
- Exemples de régions à climat tropical : Brésil, Amérique centrale, Antilles, Venezuela

2.3.7 Le climat méditerranéen

- Températures : contrastées
- Amplitude thermique annuelle : forte d'environ 15°C
- Précipitations : irrégulières ; il y a moins de 100 jours de pluie par an et elles tombent surtout sous forme d'averses brutales.
- Les saisons : été chaud et sec - hiver doux - pluies violentes au printemps et en automne
- Vents : violents : tramontane, mistral.
- Végétation : forêt clairsemée, garrigue, maquis.
- Exemples de régions à climat méditerranéen : Afrique du Nord, Espagne, sud de la France, Italie, Chili central, Californie, région du Cap (Afrique du Sud), sud-ouest de l'Australie.

2.3.8 Le climat chinois, également appelé climat subtropical humide désigne dans le langage courant le climat supra-tropical humide.

- Températures : elles peuvent augmenter ou chuter très brutalement.
- Saisons : c'est une zone climatique caractérisée par des étés chauds et humides ainsi que des hivers frais.

Il est difficile de délimiter ce climat précisément, car il constitue en fait une combinaison du climat continental par la possibilité de ses coups de froid en hiver et du climat tropical par la moitié de ses étés et ses phénomènes violents (tornades, typhons, ouragans). Il est aussi variable selon la latitude, dans l'hémisphère nord la dominance continentale au nord laissant place à des caractères de plus en plus tropicaux vers le sud.

- Exemple de régions à climat subtropical humide : côte est des USA, l'est de la Chine et de l'Australie.

2. Températures : très contrastées : de - 20°C en hiver à 30°C en été.

- Amplitude thermique annuelle : forte

- Précipitations : faibles : 400 mm par an. Elles tombent sous forme de neige en hiver et de pluies d'orage en été.

- Les saisons : hiver long et très rigoureux ($t < 0^\circ\text{C}$; gel); été chaud et pluvieux ; printemps très court ; automne sec

- Vents : violents en hiver

- Végétation : taïga, prairie, steppe.

- Exemple de régions à climat continental : Russie...

3.9 Climat continental

2.3.1 Climat Polaire

- Températures : très souvent négatives. La moyenne mensuelle ne dépasse pas 10°C.

- Amplitude thermique annuelle : très forte

- Précipitations : peu abondantes et elles tombent uniquement sous forme de neige.

- Les saisons : été très court

- Vent : très fort : blizzard

- Végétation : toundra

- Exemples de régions à climat polaire : Alaska, nord du Canada, Groenland, Sibérie, Antarctique.

2.4 Le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est essentiellement méditerranéen, c'est-à-dire caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux. Mais sous ce qualificatif général, on est appelé à distinguer une grande diversité de climats régionaux, déterminés par la situation géographique et par l'orographie de l'Algérie. Celle-ci est bordée au Nord par la Méditerranée, relativement fraîche en été, relativement chaude en hiver, au Sud par le Sahara où la température est élevée en moyenne, mais très variable dans le temps ; il en résulte pour les différentes parties de

l'Algérie, soumise à ces deux influences, des écarts de température considérables, et essentiellement variables d'une saison à l'autre (ce qui se traduit par une déformation des courbes isothermes). Les importantes chaînes de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien qui traversent le pays d'ouest en est contribuent pour leur part à différencier les climats en abaissant la température de l'air, et en augmentant les précipitations aux dépens des régions situées plus au Sud. Cette diversité des climats régionaux et locaux entraîne là bigarrure de la carte agricole de l'Algérie.

On définit pour l'Algérie les régions ou les zones climatiques suivantes:

- 4 zones climatiques et une sous zone au Nord.
- 3 zones climatiques au Sud. Pour chaque zone, on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, comprise entre 500 et 1000 m et supérieure à 1000 m.

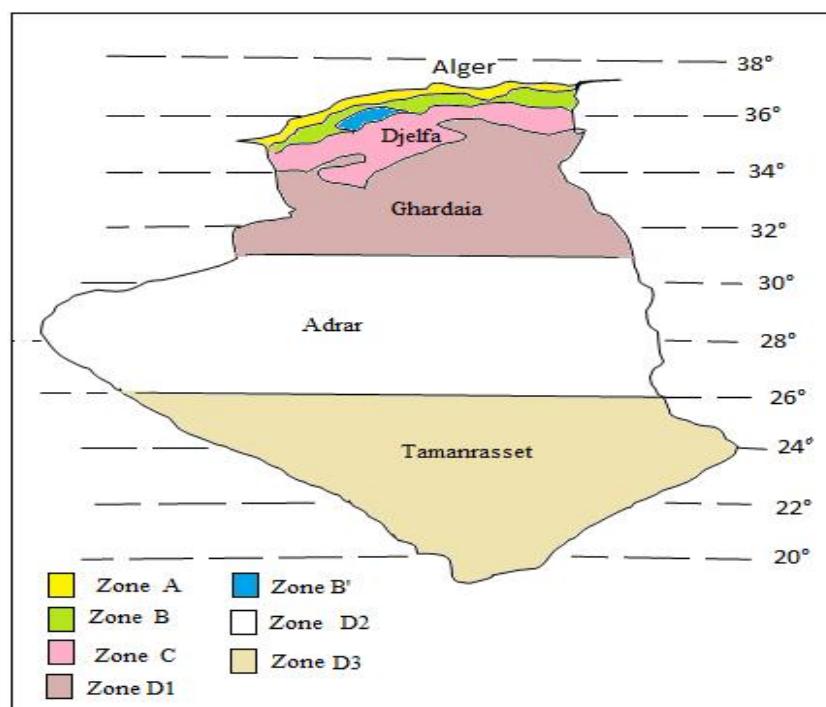
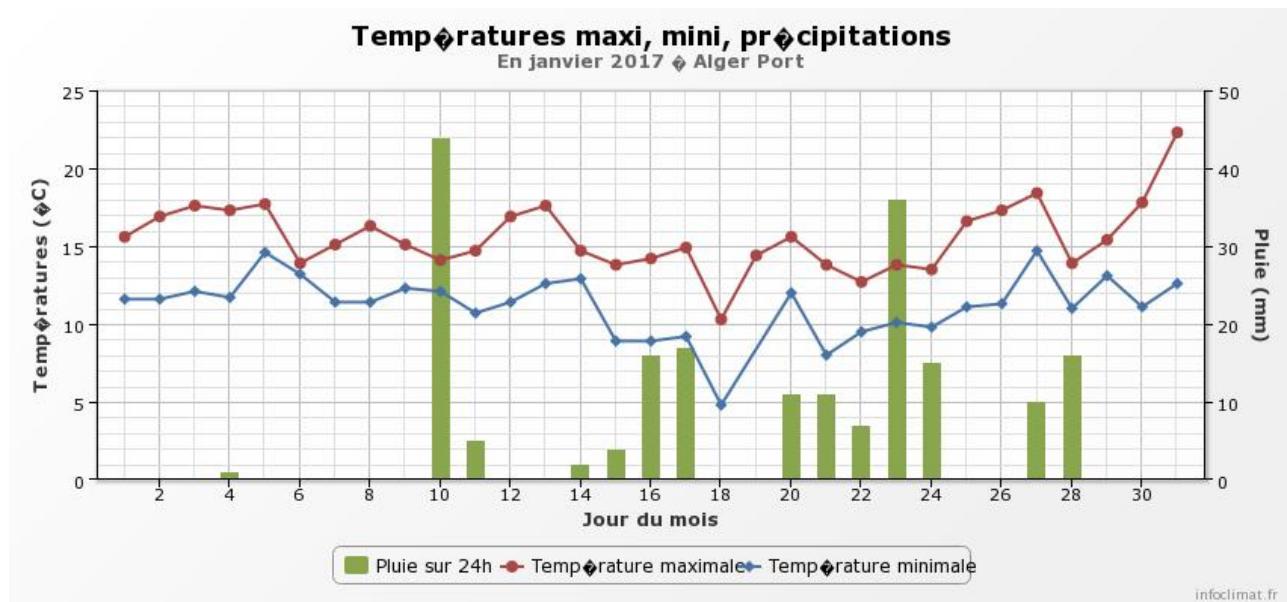


Fig. 2: carte de régions climatiques des 4 zones

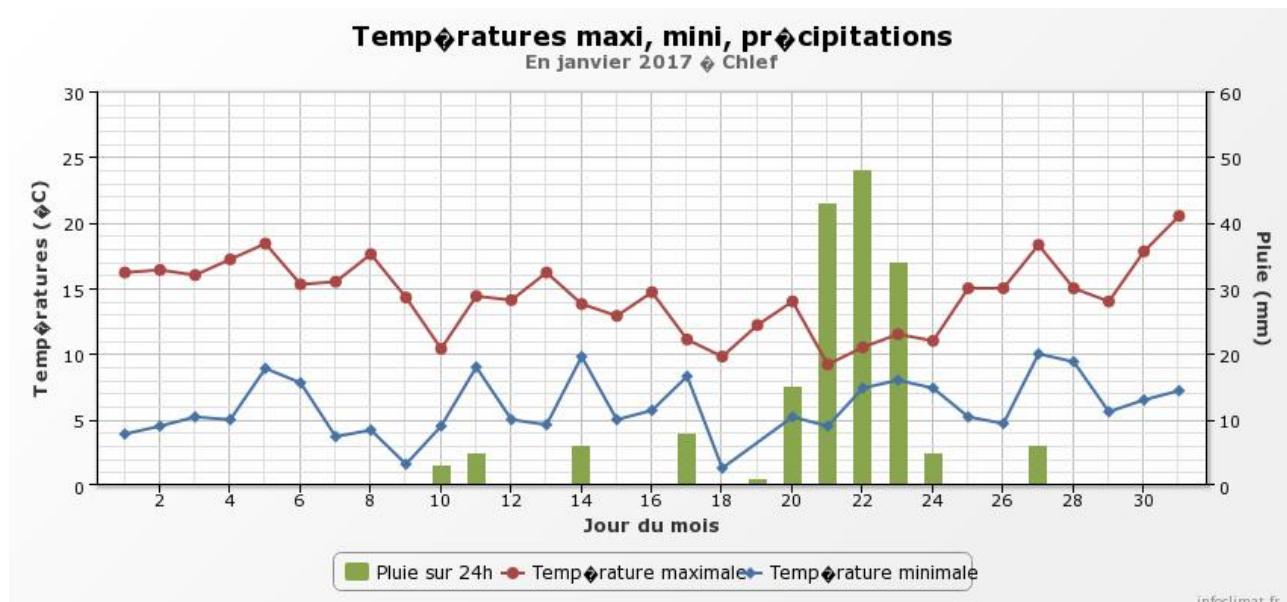
La zone A: Elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).

Cette zone bénéficie d'un climat doux et régulier, dû à l'influence modératrice de la mer. Les températures moyennes y sont sensiblement les mêmes de l'Ouest à l'Est, et en un point donné la température varie relativement peu entre le jour et la nuit comme entre l'hiver et l'été.

**Fig. 3: carte de températures min max de la station Alger port**

La zone B: Elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, autre que celle de Chlef (climat méditerranéen continental).

La plaine du Chéliff peut être considérée comme "une zone climatique un peu particulière" de l'Algérie, par les écarts de température considérables que l'on y rencontre. Distante de la mer de moins de 50 km., elle est cependant soustraite à l'influence maritime par la chaîne du Dahra qui la borde au Nord. L'important massif de l'Ouarsenis qui la domine au Sud augmente les effets du sirocco, les masses d'air transportées des Hautes Plaines s'échauffant en même temps qu'elles s'abaissent vers la plaine du Chéliff. Enfin on trouve confirmée ici la loi générale suivant laquelle toute forme concave du terrain - vallée, cuvette - entraîne de fortes variations de température,

**Fig. 4: carte de températures min max de la station chlef**

La zone B': C'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chlef, comprise entre la chaîne de l'ouarsenis et les montagnes du Dahra et des Braz.

La zone C: Elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne).

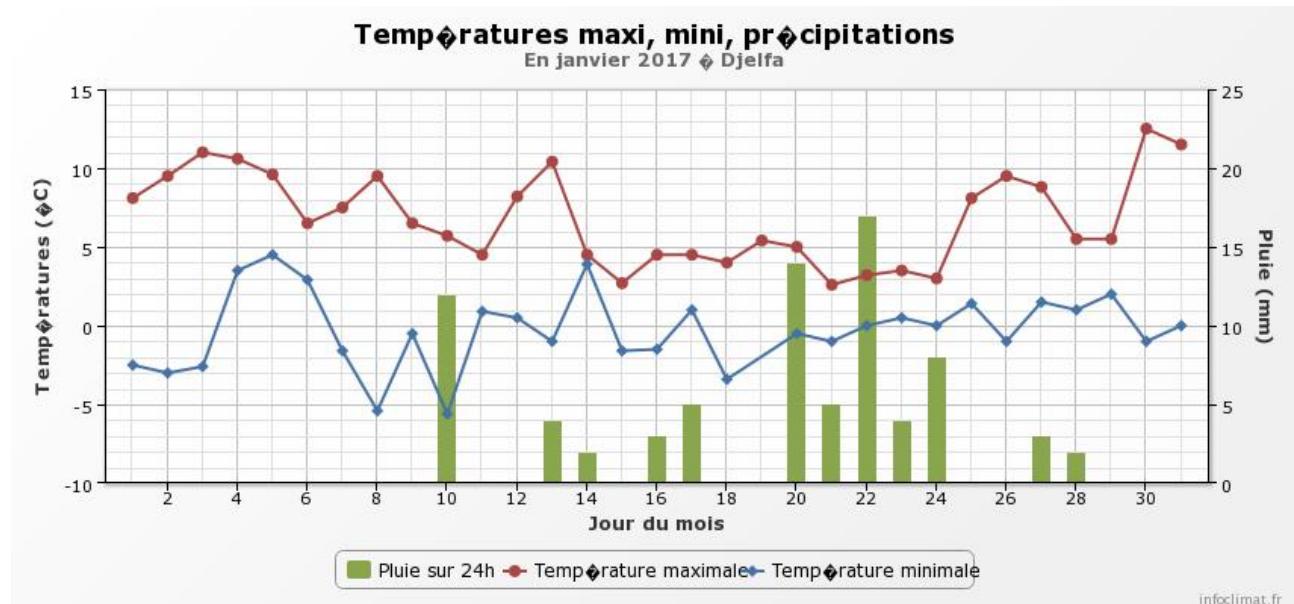


Fig. 5: carte de températures min max de la station djelfa

La zone D1: Elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°.

Au-delà de l'Atlas saharien, on observe les mêmes fortes amplitudes thermiques, mais des températures plus élevées dues à la moindre altitude et aussi à la latitude plus basse : Touggourt est un exemple typique du climat nord-sahélien, avec des maxima absolus voisins de 50°, alors que dans l'Algérie septentrionale ceux-ci dépassent rarement le 45°. La faible humidité atmosphérique permet un rayonnement intense, et les nuits peuvent être très fraîches.

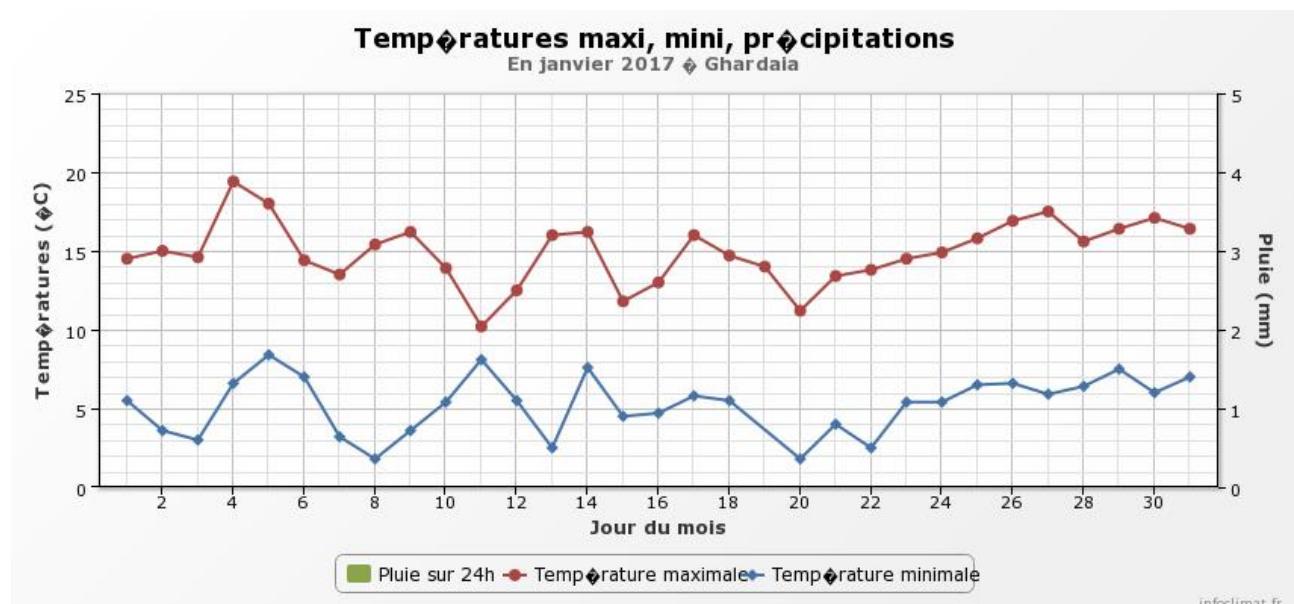


Fig. 6: carte de températures min max de la station Ghardaia

La zone D2 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°.

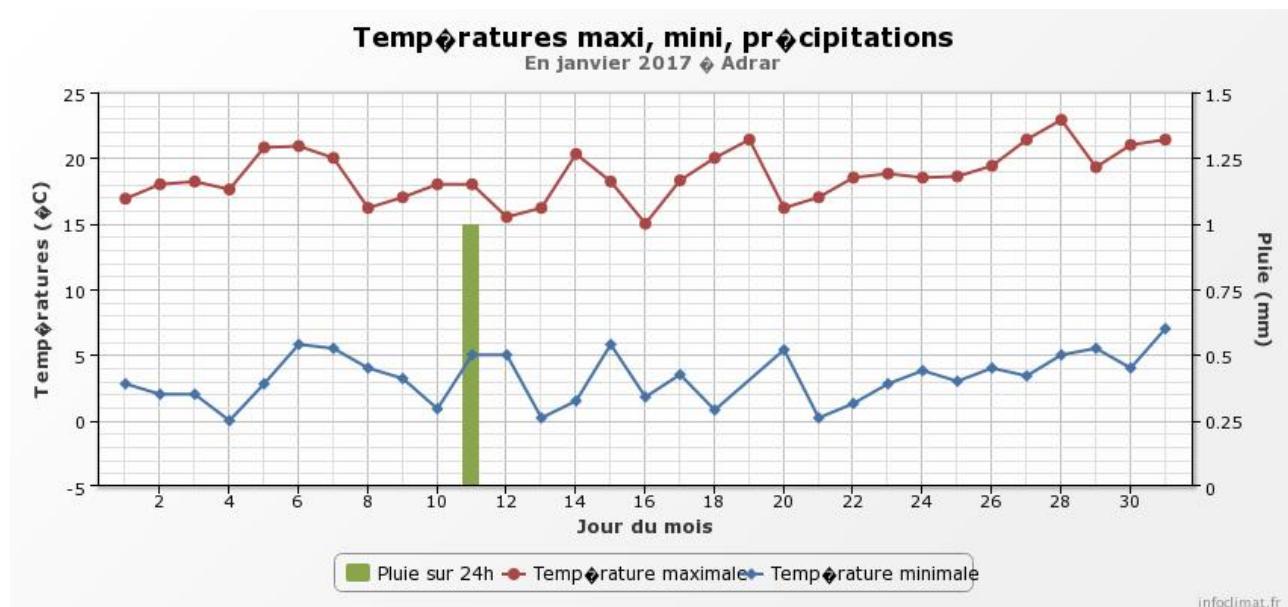


Fig. 7: carte de températures min max de la station Adrar

La zone D3 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud.

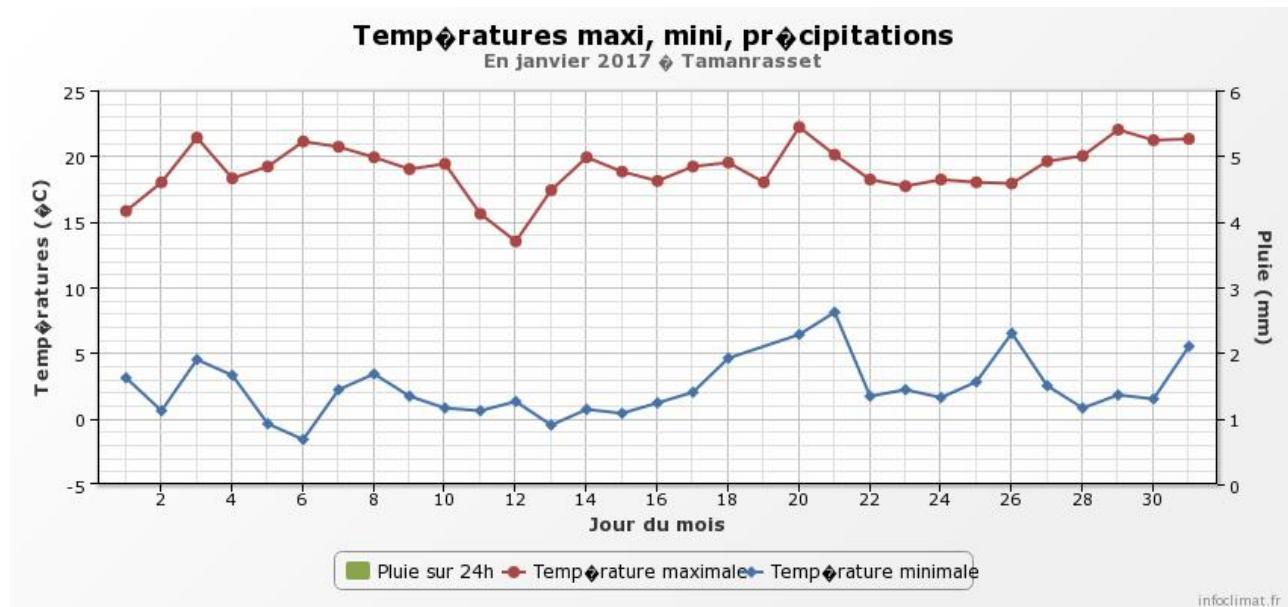


Fig. 8: carte de températures min max

2.5 Changement climatique à l'échelle globale :

Les résultats présents dans le IV eme rapport du GIEC (IPCC , 2007) pour la période 1900-2100 sont issus de deux types de modèles climatiques numériques : les modèles globaux et les modèles régionaux. Les modèles globaux couvrent l'ensemble du globe avec une faible résolution spatiale (150-250 km) et représentent tous les facteurs qui influencent le

climat. L'éventail des scénarios produits par ces modèles donne une idée du spectre des incertitudes liées aux projections climatiques. Les modèles régionaux couvrent une partie seulement du globe et ont une plus haute résolution (50-20 km) sur la zone étudiée. La simulation des processus physiques (reliefs, trait de côte complexe, contraste terre-mer, îles) leur permet d'obtenir une représentation fine du climat. Toutefois, seuls un certain nombre de facteurs est représenté, comme les évolutions de l'atmosphère et de la végétation, tandis que les caractéristiques de l'océan sont prises en compte dans des modèles globaux (Hallegatte et al , 2008).

Les changements du cycle hydrologique global lors des derniers décennies ont été associés au réchauffement observé : hausse du contenu atmosphérique en vapeur d'eau, changement des précipitations, réduction de la couverture neigeuse et fonte des glaciers, changement de l'humidité des sols et du ruissellement. Les simulations des modèles climatiques sur le XXI^e siècle s'accordent sur une hausse très probable des précipitations aux hautes latitudes, sur une partie des tropiques, et une réduction dans certaines zones subtropicales et de moyennes latitudes. Des réductions importantes pourraient se produire, allant jusqu'à 20%, dans la région méditerranéenne, les Caraïbes et les côtes ouest subtropicales de chaque continent. À partir du milieu du XXI^e siècle, le ruissellement moyen annuel des cours d'eau et la disponibilité en eau augmenteraient dans les hautes latitudes et dans certaines régions humides tropicales, et diminueraient dans les régions sèches aux latitudes moyennes et dans les zones sèches des tropiques (Bates et al , 2008). Sur le bassin du Nil, selon l'étude de (Beyene et al , 2010), les écoulements seraient de 111(114), 92(93), 84(87) % par rapport aux valeurs historiques de 1950-1999 pour les périodes 2010-2039, 2040-2069, 2070-2099 respectivement, pour le scénario global d'émissions A2 (B1) 1. Il est à noter que les scénarios d'émissions SRES B1, B2, A1B, A2 vont du plus optimiste au plus pessimiste en matière d'émissions de gaz à effet de serre et infine d'impacts du changement climatique.

Selon les régions, la hausse possible de l'intensité et de la variabilité des précipitations pourraient conduire à l'augmentation des risques d'inondation et de sécheresse. De plus, la réduction de l'eau stockée dans les glaciers et la couverture neigeuse pourraient s'accompagner d'une diminution de l'eau disponible pendant les périodes chaudes et sèches, au changement de la distribution saisonnière du ruissellement, à la hausse du ratio des flux hivernaux sur les flux annuels, et à la réduction des flux minimums également. Des régions semi-arides et arides comme la Méditerranée, l'ouest des États-Unis, l'Afrique du Sud et le nord-est du Brésil,

seraient davantage exposées aux impacts du changement climatique avec une réduction des ressources.

Le changement de l'humidité des sols dépend du volume et de la temporalité des précipitations, mais aussi de l'évaporation. Les projections de la moyenne annuelle de l'humidité des sols montrent une réduction dans les subtropiques et la Méditerranée et une augmentation pour des régions comme l'Afrique de l'Est, l'Asie centrale et d'autres zones caractérisées par une hausse des précipitations. Selon certaines projections, la recharge des eaux souterraines décroît jusqu'à 70% en 2050 dans le nord-est du Brésil, le sud-ouest de l'Afrique et la rive sud de la mer Méditerranée. Toutefois l'augmentation de la variabilité journalière des précipitations n'ayant pas été prise en compte, cette réduction selon les régions, la hausse possible de l'intensité et de la variabilité des précipitations pourraient conduire à l'augmentation des risques d'inondation et de sécheresse. De plus, la réduction de l'eau stockée dans les glaciers et la couverture neigeuse pourrait s'accompagner d'une diminution de l'eau disponible pendant les périodes chaudes et sèches, au changement de la distribution saisonnière du ruissellement, à la hausse du ratio des flux hivernaux sur les flux annuels, et à la réduction des flux minimums également. Des régions semi-arides et arides comme la Méditerranée, l'ouest des États-Unis, l'Afrique du Sud et le nord-est du Brésil, seraient davantage exposées aux impacts du changement climatique avec une réduction des ressources.(Bath et al , 2008).

Selon les projections du GIEC avec le scénario SRES A2 (scénario le plus pessimiste), en 2090, des périodes de sécheresses affectant des surfaces de 10 à 30 fois supérieures seraient probables, tandis que la fréquence et la durée moyenne des sécheresses seraient augmentées respectivement d'un facteur 2 et 6. La réduction des précipitations estivales en Europe centrales et du Sud, en combinaison avec une hausse des températures auraient comme impact la réduction de l'humidité des sols en été et des sécheresses plus fréquentes et intenses. En 2070 une sécheresse centennale, se répéterait tous les dix ans en Espagne, au Portugal, dans l'ouest de la France, la Pologne et l'ouest de la Turquie. Le risque de sécheresse serait particulièrement accru pour les régions qui dépendent de la fonte des glaciers pour leur approvisionnement durant les périodes sèches comme c'est le cas en Bolivie, Équateur, Pérou, Chine, Pakistan et Inde (Bates et al , 2008).

1 scenarios SRES

- Famille A1 : elle fait l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de
-

nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios se répartit en trois groupes qui correspondent à différentes orientations de l'évolution technologique du point de vue des sources d'énergie : à forte composante fossile (A1F1), non fossile (A1T) et équilibrant les sources (A1B). C'est la famille de scénarios les plus grands émetteurs en gaz à effet de serre.

- Famille A2 : elle décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques
- Famille B1 : elle décrit un monde convergent présentant les mêmes caractéristiques démographiques que A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information
- Famille B2 : elle décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissances démographiques et économiques, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Elle fait référence à un monde sobre en consommation énergétique et peu émettrice.

Désignations	Température (°C)						Précipitations (%)						Saisons extrêmes		
	min.	25	50	75	max.	tan.	min.	25	50	75	max.	tan.	chaude	humide	sèche
Hiver (DJF)	1,7	2,5	2,6	3,3	4,6	25	-16	10	-6	-1	6	>100	93	3	12
Printemps (MAM)	2,0	3,0	3,2	3,5	4,5	20	-24	17	16	-8	-2	60	98	1	31
Eté (JJA)	2,7	3,7	4,1	5,0	6,5	15	-53	35	24	14	-3	55	100	1	42
Automne (SON)	2,3	2,8	3,3	4,0	5,2	15	-29	15	12	-9	-2	90	100	1	21
Annuel	2,2	3,0	3,5	4,0	5,1	15	-27	16	12	-9	-4	45	100	0	46

Fig.9 : Résumé des résultats des 21 modèles globaux du GIEC sur le changement de la température de surface, des précipitations et de certains extrêmes pour la zone méditerranéenne calculés entre les périodes 1980-1999 et 2080-2099 pour le scenario A1B, source : IPCC [2007]

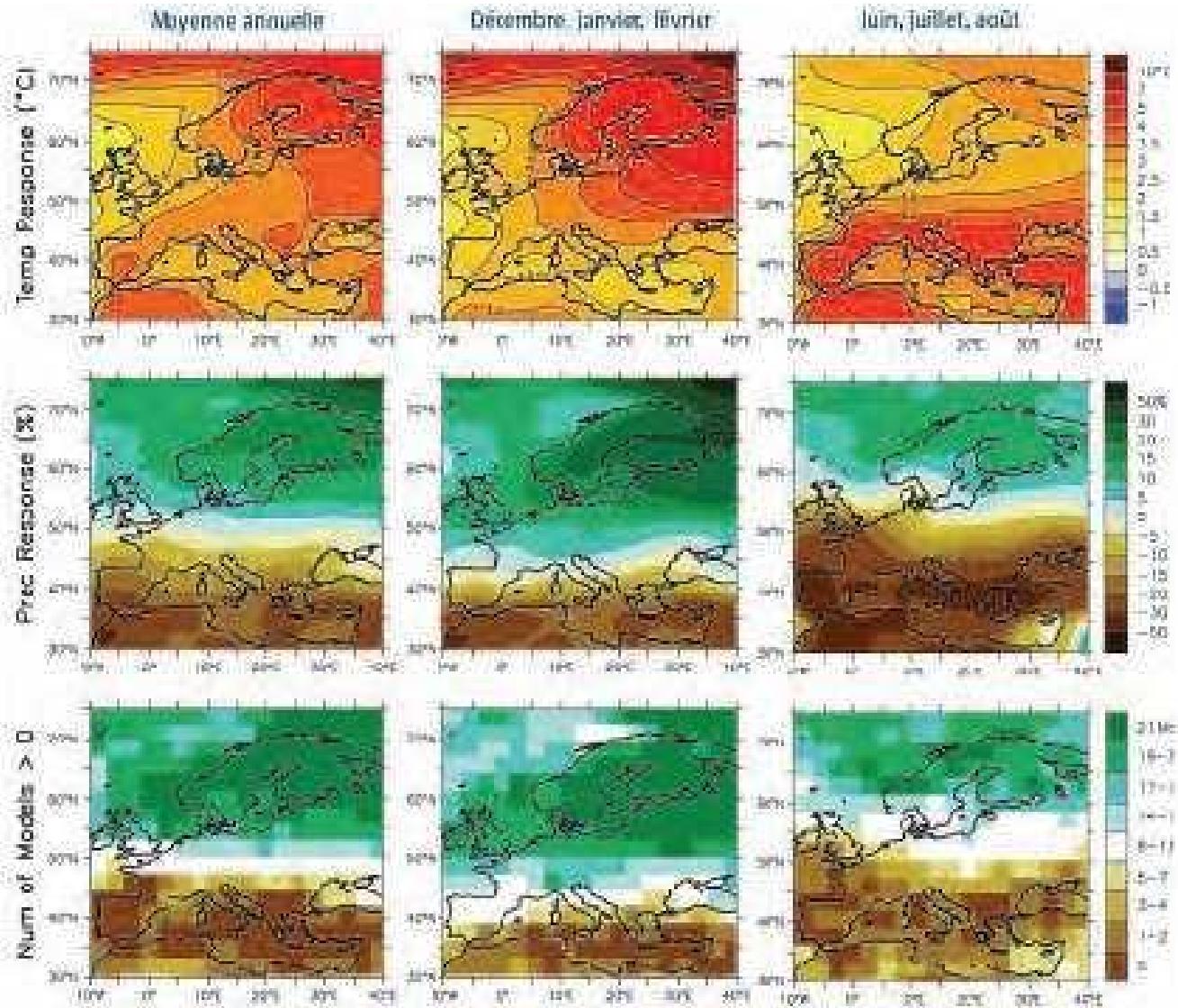


Fig. 10: Comportement moyen des 21 modèles globaux du GIEC concernant le changement de température et de précipitations pour l'Europe pour le scenario A1B, comparaison des périodes 1980-1999 et 2080-2099 en moyenne annuelle, pour l'hiver et l'été, source : IPCC [2007]



Fig. 11: Changements de précipitations sur la zone euro-méditerranéenne pour les 21 modèles globaux du GIEC et pour la moyenne des modèles (montrée en bas à droite (MEAN)) entre les années 1980-1999 et 2080-2099 pour le scenario A1B, source : IPCC [2007]

2.6 Le réchauffement climatique dans le monde :

Le réchauffement climatique est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère qui se produit dans le monde entier et sur plusieurs années.

On utilise le plus souvent ce terme pour parler du réchauffement climatique touchant actuellement notre planète, et ce, depuis la fin du XX^{ème} siècle. Ce phénomène semble lié à l'effet de serre dû à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les changements climatiques ont toujours existé. Ces changements varient entre période glaciaire et réchauffement de la planète : l'ère dans laquelle nous rentrons s'avère être la période de réchauffement de la planète. Cela dit ce réchauffement n'est pas seulement dû au changement habituel du climat ; celui-ci est dû en grande partie au rejet des gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone ou CO₂ notamment) par l'homme.

Selon certaines prévisions la température moyenne pourrait augmenter de 1,1°C à 6,4°C d'ici à 2100. Ce serait la plus forte hausse de température depuis 10 000 ans.

Cette chaleur renforcerait les inégalités entre les pays : certains pays aujourd'hui en difficulté le seraient encore plus. La sécheresse augmenterait dans les pays subtropicaux (c'est-à-dire situés en dessous du tropique du Cancer comme l'Australie, l'Argentine, la Côte d'Ivoire, la Thaïlande) et méditerranéens.

Le réchauffement entraînerait une fonte des glaces et donc une augmentation du niveau de la mer (entre 9 et 88 cm). La banquise pourrait ainsi disparaître. Les précipitations augmenteraient et les tornades, les ouragans ou les tempêtes se produiraient plus souvent.

D'une façon plus générale, la lutte contre le réchauffement climatique doit être prise en compte dans une politique de développement durable.

Les pays ont trouvé plusieurs accords pour remédier à ce problème, notamment le protocole de Kyoto qui incite les pays à diminuer leur production de gaz à effet de serre.

2.7 Variabilité pluviométrique :

Un des éléments intégrateurs de la variabilité climatique, l'expression « variabilité pluviométrique » a été définie par plusieurs auteurs dont (Boko ,1988 ; Beltrando ,1995 ; Brou ,2005). Elle fait ressentir la mobilité ou la variation du schéma pluviométrique moyen et l'accentuation des valeurs extrêmes à toutes les échelles temporelles et spatiales. Autant que possible, elle est analysée par rapport aux valeurs centrales ou médianes des séries plutôt que par rapport aux valeurs moyennes ou normales, qui sous-entendent l'idée de fixité du climat. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique ou à

des variations du forçage externe anthropique. Dans ce travail, il s'agit de caractériser les tendances et les cycles.

2.8 Tendances pluviométriques :

Au sens général, une tendance se traduit par l'évolution probable d'un phénomène au cours d'une longue période. 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. Selon le Guide des pratiques climatiques de (l'OMM ,2005), cette variation tend à se maintenir dans un sens déterminé pendant de nombreuses périodes, allant de quelques années à plusieurs décennies.

Chapitre 3

Présentation la zone d'étude et collecte des données

3.1 Présentation du site d'étude :

3.1.1 Situation géographique :

Le bassin versant de l'Oued Seybouse est situé au Nord Est de l'Algérie entre les latitudes 36°15' et 37° Nord et longitudes 7°15' et 7°55' est. Il fait partie de la région hydrographique CONSTANTINOIS –SEYBOUSE –MELLEGUE, bordé au Nord par la mer méditerranéenne et au Sud par le haut plateau Constantinois.

L'Oued Seybouse draine un vaste bassin de 6471 Km², il s'étend vers le sud sur une distance de 160 Km jusqu'aux confins de l'Atlas saharien., naît dans les hautes plaines semi-arides. La Seybouse est donc continentale par sa naissance et méditerranéenne à sa fin. La Seybouse résulte de la confluence de deux oueds qui sont le Cherf et le Bouhamdanne.

Le bassin versant du Seybouse englobe sept wilayas de l'Est algérien, la wilaya de Guelma en totalité et partiellement les wilayas de : Annaba, El –Taref, Oum El Baouaghi, Skikda, Souk Ahras et Constantine, elles englobent 68 communes, dont 30, sont entièrement incluses, la population est estimée à plus de 1.400.000 habitants.

La Seybouse est un des Oueds les plus importants d'Algérie par la longueur de son parcours, le bassin de la Seybouse se composé de six sous bassins principaux (voir le classement ci-dessous), dont les trois premiers sous bassins sont appelés: les hautes plaines (haute Seybouse), le tell méridional (moyenne Seybouse) et le tell septentrional (basse Seybouse).

- * Le sous bassin Charef amont (14-01) ;
- * Le sous-bassin Charef aval (14-02) ;
- * Le sous-bassin oued Bouhamdane (14-03) ;
- * Le sous -bassin Seybouse moyenne dite aussi Guelma (14-04) ;
- * Le sous-bassin Mellah (14-05) ;
- * Le sous-bassin Maritime (14-06)

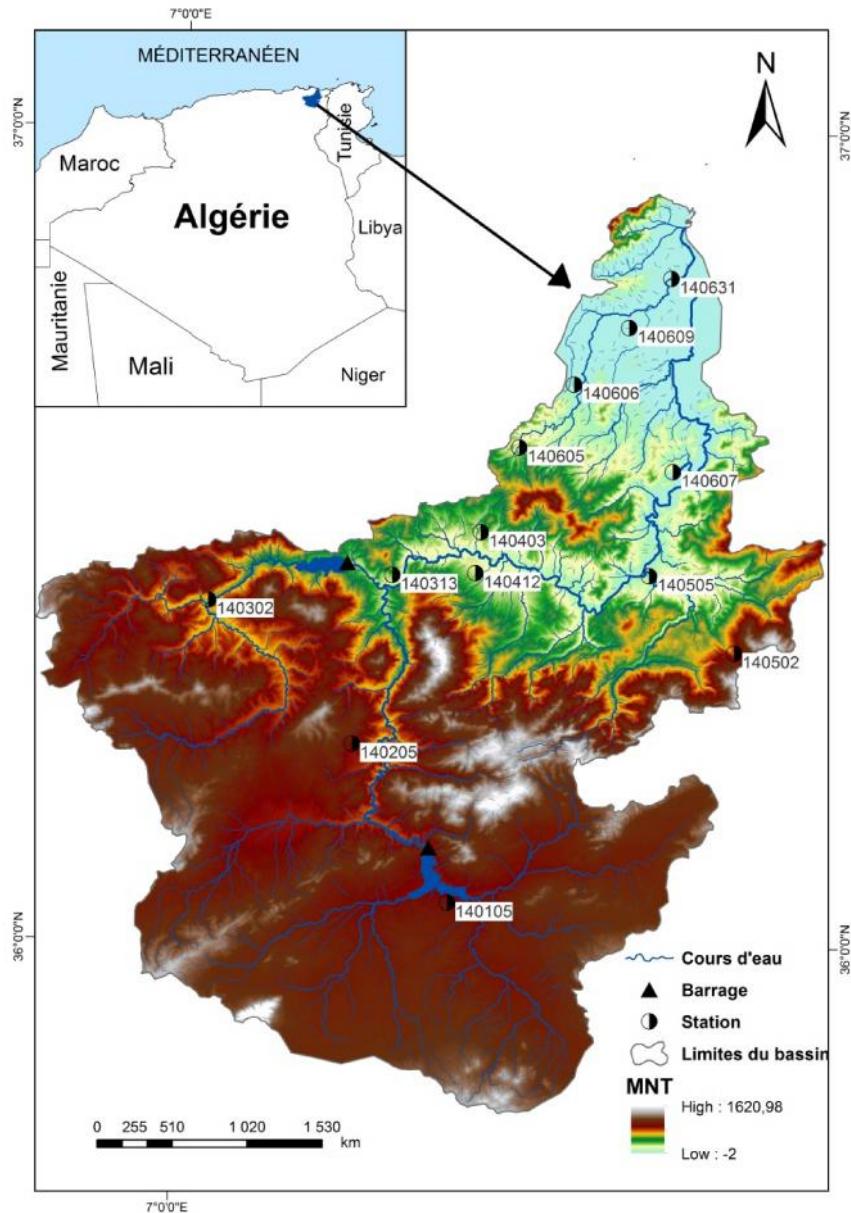


Fig. 12 : Situation du bassin versant de l'Oued Seybouse

Le sous bassin de Charef amont se compose essentiellement de la plaine de Sedrata et de la plaine de Tamlouka, ce dernier est drainé par l'Oued Melah qui prend ses sources dans le Djebel Amar. La plaine de Sedrata représente la plus grande partie de ce sous-bassin.

Le sous bassin de Charef aval de type "gouttière" ou de nombreux petits Oueds orientés est – Ouest, dans son ensemble sont orienté à l'Oued de Charef, une série des Oueds dans les deux rives droite et gauche, sur la rive droite, ce sont l'Oued Nil, l'Oued Sept, l'Oued Chenieur, sur la rive gauche, ce sont l'Oued Medjez Bgar, l'Oued Anouna, l'Oued Mgaisba.

Le sous bassin oued Bouhamdane : l'Oued Zenati et l'Oued Sabath forment par leur jonction l'Oued Bouhamdane, qui se jette dans la Seybouse à Médjez Amar, il est l'affluent le plus important après le Charef, entre Medjez Amar et Bordj Sabath la chaîne numidique a obligé le Bouhamdane à prendre la même direction.

Le sous bassin Seybouse moyenne: à Medjez Amar, la Seybouse considérablement accrue par l'union du Bouhamdane et du Charef, débouche dans le vaste bassin de Guelma; l'Oued suit l'axe de ce dernier orienté Ouest –Est et le traverse dans toute sa longueur sur environ 25 Km, durant ce parcours la Seybouse a tracé de nombreux méandres.

Le sous bassin Mellah : d'orientation Sud-Ouest–Nord–Est et en forme de couloirs, le sous bassin du Mellah est topographiquement très hétérogène. Le cours principal est formé par la réunion de l'Oued Sfa , l'Oued Cham et de l'Oued Ghanem.

Le sous bassin Maritime: Le cours d'eau de la Seybouse prend sa voie entre Bouchegouf et Dréan dans une direction Sud-Nord, où il reçoit oued Ressoul, qui est un affluent très dynamique, qui draine la région humide de Ain Berda. Après, la seybouse continue sa route vers la mer, en formant des méandres et des bras morts, qui redevient fonctionnelle lors des grandes crues.

3.1.2 Aperçu topographique :

Ces grands ensembles physiques présentent des caractéristiques topographiques qui les différencient nettement :

3.1.2.1 La zone des Hautes Plaines :

Elle intègre en totalité le bassin du Haut Cherf. C'est une zone au relief plat, parsemée de plaines (plaine de Sedrata, plaine d'Ain Babouche, plaine de Tamlouka) avec un encadrement montagneux imposant :

- djebel Tiffech (1164 m);
- djebel El Guelaa au Nord de Ain Beida (1135 m);
- djebel Sidi Reghiss (1635 m);
- Chebket Sellaoua d'orientation SW-NE avec djebel El Hamra (1188m), Koudiat El Bouib (1117 m);
- Djebel Terraguel (1156 m).

Le bassin-versant du Cherf aval est une zone de transition entre les Hautes Plaines et le Tell, les altitudes diminuent mais le relief devient compartimenté.

3.1.2.2 Le domaine sud-Tellien :

Il couvre une superficie importante qui correspond assez étroitement sur le plan morphostructural à la chaîne numidique. À ce domaine appartiennent plusieurs sous- bassins,

le bassin aval de l'oued Cherf ; le bassin de l'oued Bouhamdane ; les affluents de la Seybouse dans la vallée de Guelma (oued Halia, oued Bou Sorra, oued Zimba , affluents de rive gauche dans la vallée de Guelma) ; le bassin de l'oued Mellah; la Moyenne Seybouse avec des reliefs encadrant la vallée de Guelma (courbe qui encadre la vallée= 200 à 300 m). Sur le versant nord, les altitudes augmentent progressivement jusqu'à 583 m (Kef Es Soud), et Kef El Mansour (932 m).

Le Versant Sud est plus étendu, plus vaste spatialement, et présente des altitudes plus élevées : il correspond au versant nord des monts de la Medjerdah. Le djebel Mahouna culmine à 1051 m (Koudiat Ed Drizina).Le versant nord des monts de la Medjerdah est occupé par les affluents de la Moyenne Seybouse, et le bassin de l'oued Mellah.

3.1.2.3 Le domaine Tellien du Nord :

La Basse Seybouse présente un relief dissymétrique avec une zone de moyennes montagnes, relativement accentué sur la rive gauche de l'oued Seybouse.

À l'extrême Nord-Ouest, le massif de l'Edough est à une altitude de 1008 m (Kef Seba).

3.1.3 Géologique :

3.1.3.1 Les grandes unités géologiques :

Le bassin versant de la Seybouse s'étend sur quatre grandes unités géologiques orientées sud-ouest, nord-est : (**Fig.13**)

3.1.3.1.1 L'Atlas Saharien :

C'est une succession de synclinaux occupés par un matériel miocène, pliocène et quaternaire ainsi que d'anticlinaux affectant des marnes et les calcaires du Crétacé.

3.1.3.1.2 L'Atlas Tellien :

Il correspond à un ensemble constitué de marne, de marnocalcaires, et de calcaire du Crétacé inférieur.

3.1.3.1.3 La chaîne Numidique :

C'est une vaste nappe de charriage d'argile et de grés oligocène. Elle est venue sur une autre nappe de charriage antérieure, constituée de marne et de calcaires marneux crétacés et éocènes.

3.1.3.1.4 Le Massif de l'Edough :

Il correspond aux affleurements actuels des formations cristallophylliennes, celles-ci comprennent des schistes, des micaschistes et des gneiss, ainsi que des calcaires. Entre la chaîne Numidique et la Massif de l'Edough, viennent s'entasser sur plusieurs centaines de mètres des formations argile- gréseuses et marneuses reposantes sur un substratum de « Flysch » Numidie et qui constitue la plaine de la basse Seybouse. La haute Seybouse

correspond à l'Atlas Saharien alors que l'Atlas Tellien est la chaîne Numidique formant la moyenne Seybouse.

3.1.3.2 Les grands ensembles lithologiques

3.1.3.2.1 Haute Seybouse :

Le secteur du Haut Cherf est formé essentiellement par des formations quaternaires, qui sont constituées d'argile, de sable. Les affleurements du Crétacé supérieur ou du Sénonien, entourent la région de Sédrata, qui est constitué par des marnes- grises, des marno- calcaires et des marnes noirâtres.

Entre le Djebel Tellez et Djebel Tiffech, s'étend la plaine de Tiffech, constituée par des formations argilo- sableuses. Le bassin de Haut Cherf est encadré au Sud-Est par des calcaires, alors que le Sud- Ouest et une partie du centre sont occupés par des calcaires et des marno- calcaires. Au Nord, on rencontre surtout les formations du Miocène à dominance marneuse et des bancs sableux et gréseux.

Au centre, on y rencontre les formations quaternaires qui sont constituées de gravier, de sable et de limon.

3.1.3.2.2 La moyenne Seybouse :

La zone Sud-Ouest du bas Cherf correspond à la plaine de Tamlouka. Cette plaine est formée par des calcaires du Crétacé inférieur. Il s'agit d'un synclinal comblé par les sédiments du Mio-Plio-Quaternaire à dominance argileuse, sableuse et graveleuse.

A la confluence des oueds Mgaïsba et Cherf, apparaissent des formations du Moi- Pliocène constituées d'argile, des grés numidiens et de marno-calcaire. La région de Sellaoua est constituée par des bancs calcaires. La dominance du secteur d'Oued Zenati correspond essentiellement de grés numidien, d'argiles et de marnes.

La région de Gulema est constituée de terrains sédimentaires d'âge crétacé, oligocène, Moi- Pliocène et Quaternaire. Le fond du bassin de Gulema est occupé par une plaine alluviale correspond à un synclinal comblé par des argiles, de conglomérats, de marne calcaire, des grés numidiens et des calcaires lacustres.

Les formations numidiennes se développent largement au sud de Gulema en occupant la partie montagneuse jusqu'à Sédrata. Ce sont surtout les calcaires yprésiens qui dominent, viennent ensuite les grés numidien du flanc Est de la Mahouna. Les séries de marne, de marno-calcaire et l'argile. Entre Medjez Amar et la localité de Tabouche apparaissent les marno-calcaires. La formation numidienne dans la région Sud de Gulema est constituée d'une alternance d'assises gréseuses et de séries argileuse ou argilogrèseuse.

Au Nord de Héliopolis, d'El Fedjoudj et Guelbt Bou sba, affluent des formations marneuses et schisteuses, alors qu'à l'ouest de cette zone, s'élèvent les calcaires sénoniens du Djebel Debar et Taya.

La dépression de Bouchegouf est encadrée à l'Ouest et au Nord par des grés, au sud par des formations triasiques marneuses et gypseuses. Au centre elle est comblée par les alluvions déposées par la Seybouse.

Au Sud du bassin du Melah, les formations sont constituées de calcaires yprésiens et de marnes et de marno-calcaire. Au centre, le Trias domine et il est constitué d'argiles et de gypse broyé.

3.1.3.2.3 La basse Seybouse :

Sa partie Sud est constituée en majeure partie d'argiles rouge numidiennes.

Au Sud- Ouest, ce sont les marno-calcaires et les flyschs d'Aïn Berda qui dominent.

Au centre, la plaine Ouest d'Annaba, correspond à un fossé d'effondrement rempli par des sédiments pliocènes et quaternaires.

Enfin, la zone Nord-Ouest est occupée par le flanc est du massif de l'Edough, qui correspond à des roches cristallines (gneiss, schistes, micaschistes).

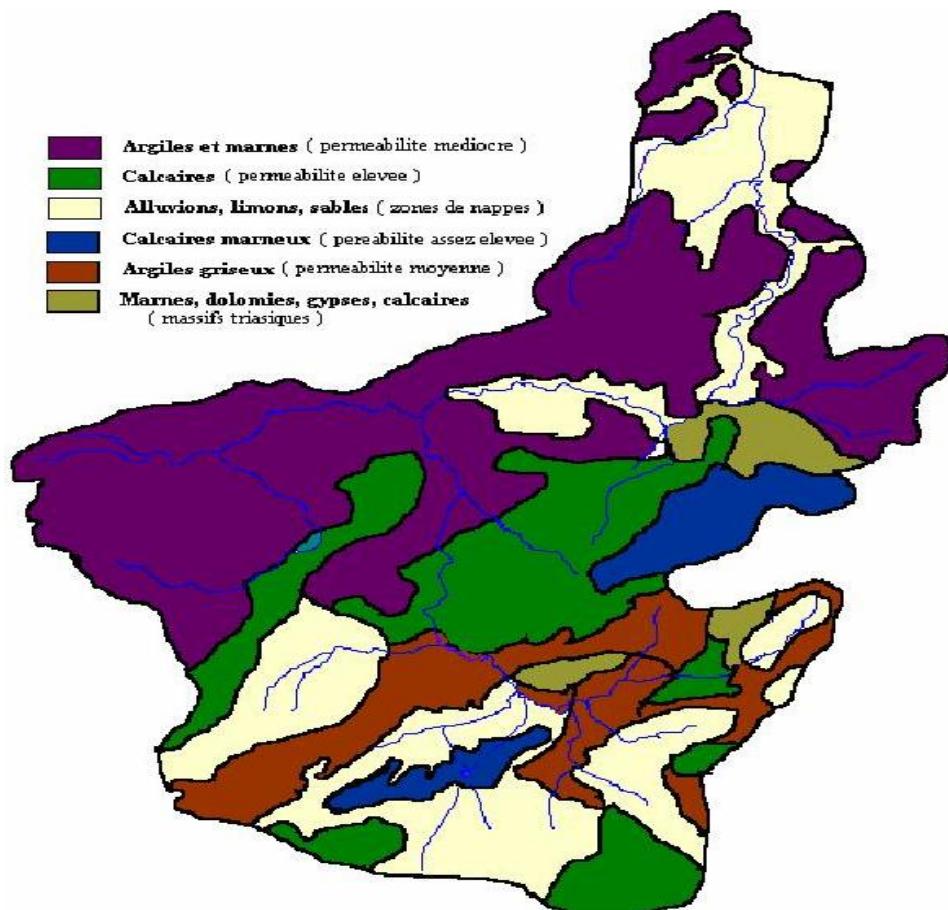


Fig13 : Carte géologique du bassin versant de la Seybouse

3.1.4 Climat :

Le climat de bassin Seybouse se caractérise par un climat méditerranéen avec diverses zones pluviométriques distinctes. Au nord une zone pluviométrique relativement homogène qui dépasse (900mm) et qui correspond à la plaine d'Annaba au centre du bassin le cloisonnement du relief entraîne une mosaïque de climats locaux, cet ensemble de dépressions (Guelma, Bouchegouf, Oued Zenati) introduit des écarts marqués dans la pluviométrie moyenne indépendamment de l'altitude ou de la distance à la mer (602 mm) à la station d'Ain Berda (530 mm) à la Guela et Boumba. Dans le grand ensemble qui est l'Atlas Tellien, la pluviométrie est entre 600 mm et 700 mm couvre tout le Djebel Mahouna et la haute Bouhamdane. Au sud de l'Atlas Tellien, la répartition de pluies apparaît comme homogène, ce sont les hautes plaines qui s'individualisent par un climat méditerranéen continental plus sec cerné par l'isohyète 500 mm.

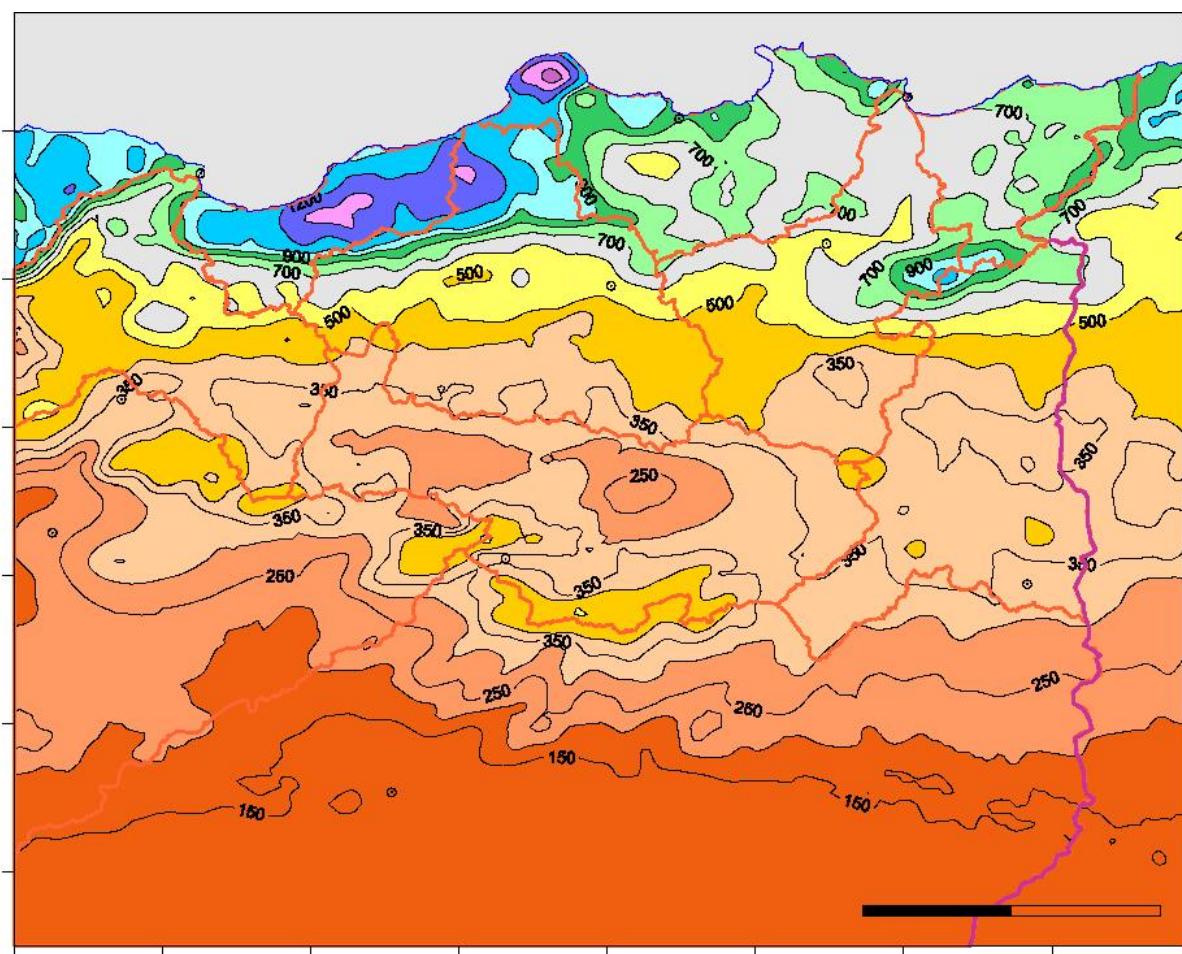


Fig.14 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (1965-95)

(D'après ANRH-GTZ ,2003) In Azzedine MEBARKI et Jean-Pierre LABORDE

(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 Mébarki A, 2005)).

La plaine de Terraguel fait partie du bassin versant de la haute Seybouse et précisément dans la haute plaine de Sedrata est caractérisée par un climat semi-aride avec une précipitation annuelle moyenne de 322.85mm.

Pour bien décrire le facteur température dans la Seybouse, on désigne les deux saisons thermiques suivantes :

Saison chaude : Elle est marquée par l'augmentation générale de la température dans le bassin. Les maximums absolu sont partout élevés en juillet, particulièrement à l'aval et l'amont du bassin, 46 C° à Annaba, 34,9 C° à Ain Berda, et 35,6 C° à Guelma. Les moyennes minimales sont 15,4 C° à Annaba, 19,9 C° à Ain Berda, 19,8 C° à Guelma, 15,1 C° à Sedrata.

Saison froide : Elle est caractérisée par des moyennes mensuelles inférieures à 17 C° de novembre à avril et un minimum en janvier. La décroissance de la valeur thermique vers le sud s'explique par la continentalité et l'altitude. Sedrata à 80 m d'altitude enregistre 5,3 C° en janvier, Guelma à 230 m d'altitude et à 64 Km du littoral enregistre 10,5 C°. Ain Berda à 76m d'altitude et à 35 Km de la côte enregistre 11,9 C°. Et enfin, Annaba à 3m d'altitude a une température mensuelle observée de 11,8 C°. La moyenne minimale mensuelle varie entre 0,3 C° à 3,3 C° dans la plaine littorale et la haute plaine de Sedrata et de 8,4 C° sur l'Atlas Tellien et la chaîne Numidique, pendant les trois mois consécutifs de décembre, janvier et février. Enfin, Les minima absolus observés vont jusqu'à -6,3 C° à Sedrata en décembre et 2 C° à Annaba en mars.

3.1.5 Les zones bioclimatiques :

Le domaine bioclimatique de notre région d'étude est défini par le calcul, les précipitations et les températures afin de caractériser le rythme climatique au bassin de Seybouse, ce quotient définit 3 grands types de bioclimat méditerranéens

3.1.5.1 Le domaine humide :

Ce domaine est caractérisé par une pluviométrie supérieure à 900 mm et une forte humidité de l'air, il est caractéristique de la région littorale et il est particulièrement développé dans toute la région du Sud-Est de Skikda et le Nord-Est d'Annaba; une poche est localisée à l'intérieur au niveau de la région de Souk Ahras épousant les monts de la Medjerda.

3.1.5.2 Le domaine subhumide :

Il est caractérisé par une pluviométrie supérieure à 600 mm, il est aussi caractéristique de la région littorale où il partage sa dominance avec le domaine humide bien qu'il soit plus développé que ce dernier

3.1.5.3 Le domaine semi-aride :

Il est caractérisé par une pluviométrie qui fluctue entre 300 mm et 600 mm, il est localisé au niveau des bassins intérieurs et représentés par une poche au niveau de la région de Guelma, il est nettement développé dans les hautes plaines qui le prolongent vers le Sud.

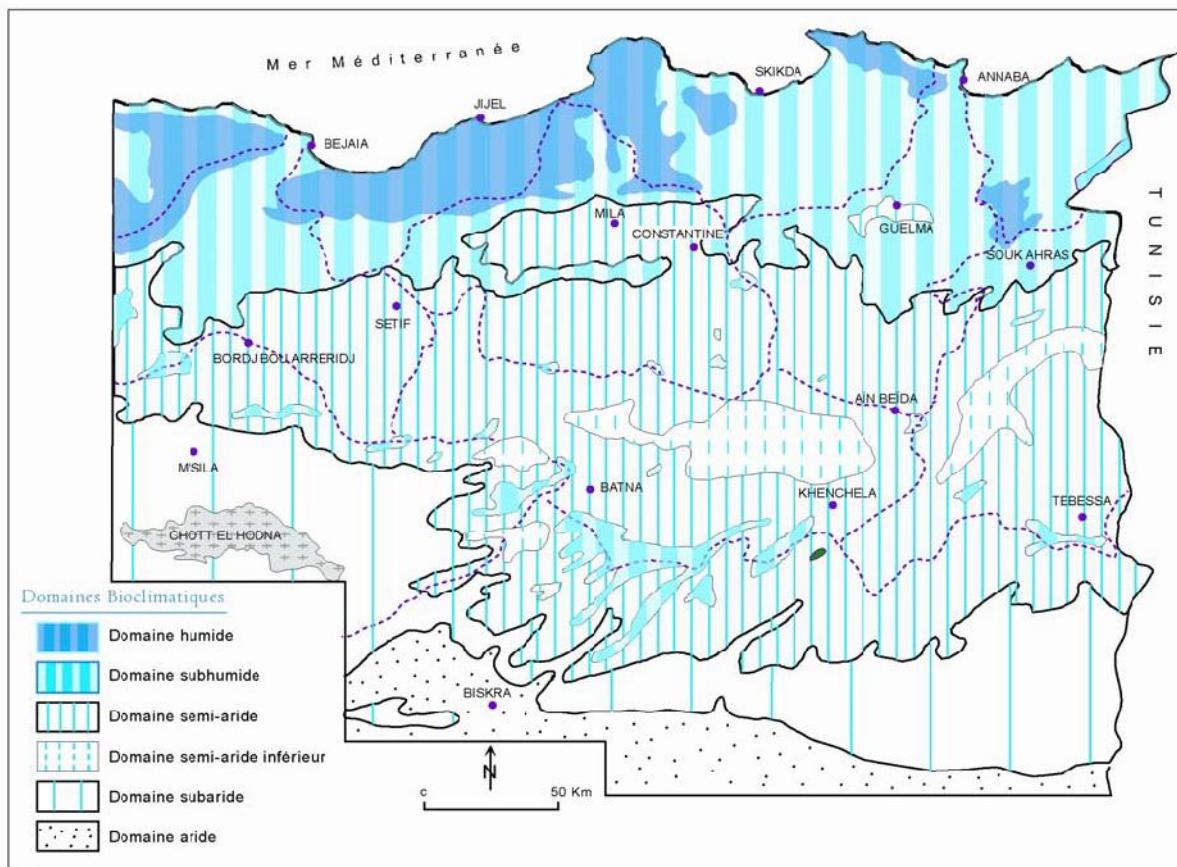


Fig. 15 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien

(Établie d'après Côte M., 1998a)

3.1.6 Réseau hydrographique bassin de la Seybouse :

Le bassin versant, appelé aussi bassin de drainage d'un oued, en un point donné de son cours, est l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de l'oued.

La définition topographique d'un bassin versant fait passer ses limites par les lignes des crêtes. Le bassin versant à une fonction de collecteur, il recueille les pluies et les transforme en écoulement à l'exutoire. Cette transformation est fonction des conditions climatiques et

des caractéristiques physiques du bassin versant (forme, relief, réseau de drainage, nature du sol et couverture végétale). Il présente des ensembles naturels fortement variés qui agissent sur le comportement hydrologique du bassin depuis les hautes plaines jusqu'à la chaîne numidique. Il est subdivisé en trois zones principales du Sud vers le Nord : la haute, la moyenne et la basse Seybouse.(fig .16)

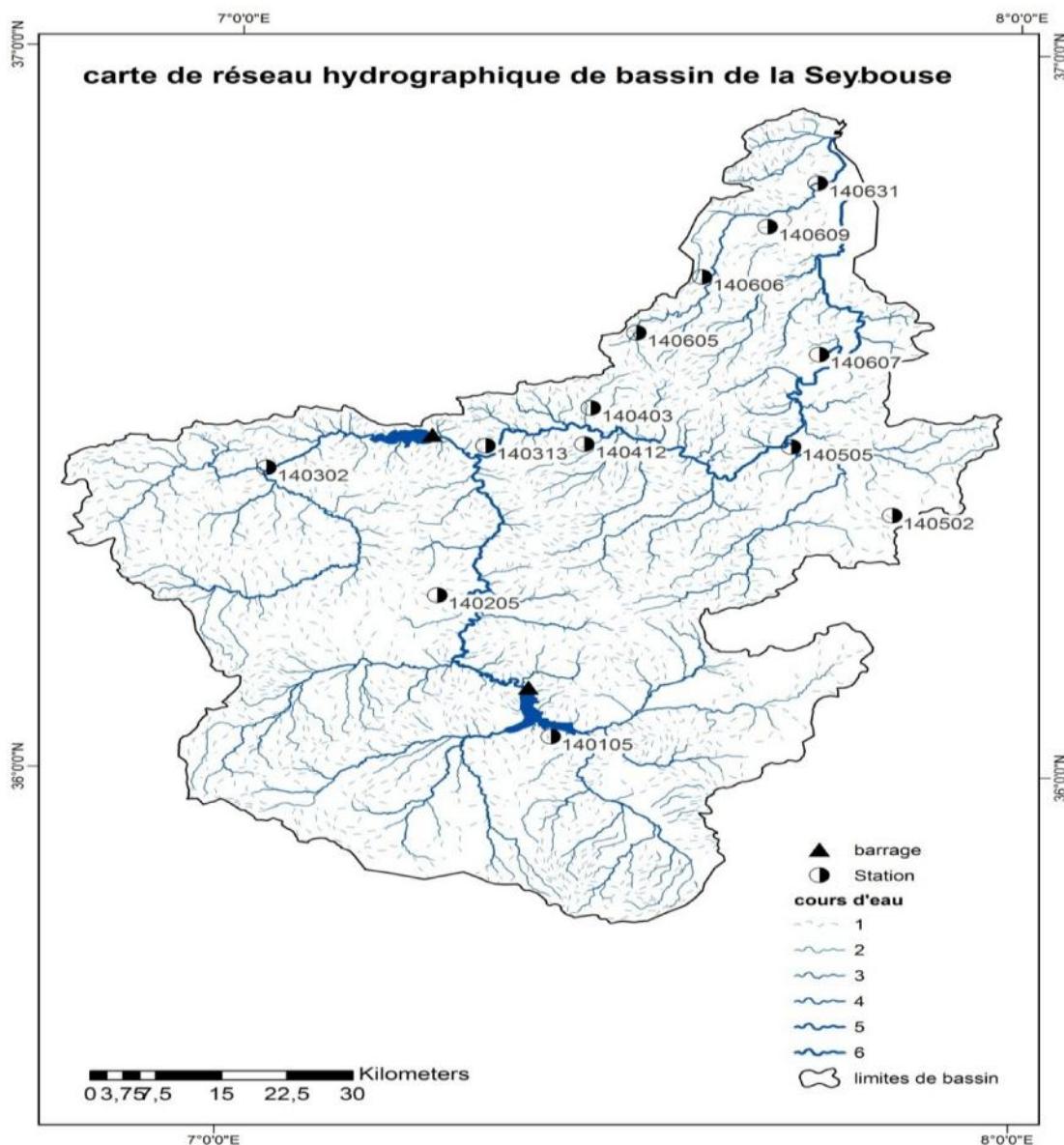


Fig.16 : carte de réseau hydrographique bassin de la Seybouse

Le bassin la Seybouse s'étend sur 160 km, suivant une disposition sensiblement Sud-Ouest–Nord-Est, des confins des Garaet El Tarf et Guelif au Sud, jusqu'à la mer au Nord. L'oued Cherf prend naissance dans les Hautes Plaines (Berriche et Ain Babouche) et rencontre à

Chapitre 3

l'ouest de Guelma, l'oued Bouhamdane qui coule Sud-Ouest - Nord-Est, le long du versant Sud-tellien.

Ces deux cours d'eau donnent lieu à l'oued Seybouse qui s'écoule d'ouest en est jusqu'à sa confluence avec l'oued Mellah, affluent issu du versant septentrional bien arrosé des monts de Medjerda (cf. profil en long, **fig.17**). Depuis, la Seybouse change de direction pour rejoindre, plus au Nord, la mer Méditerranée, après avoir traversé la plaine côtière, comprise entre Dréan et Annaba.

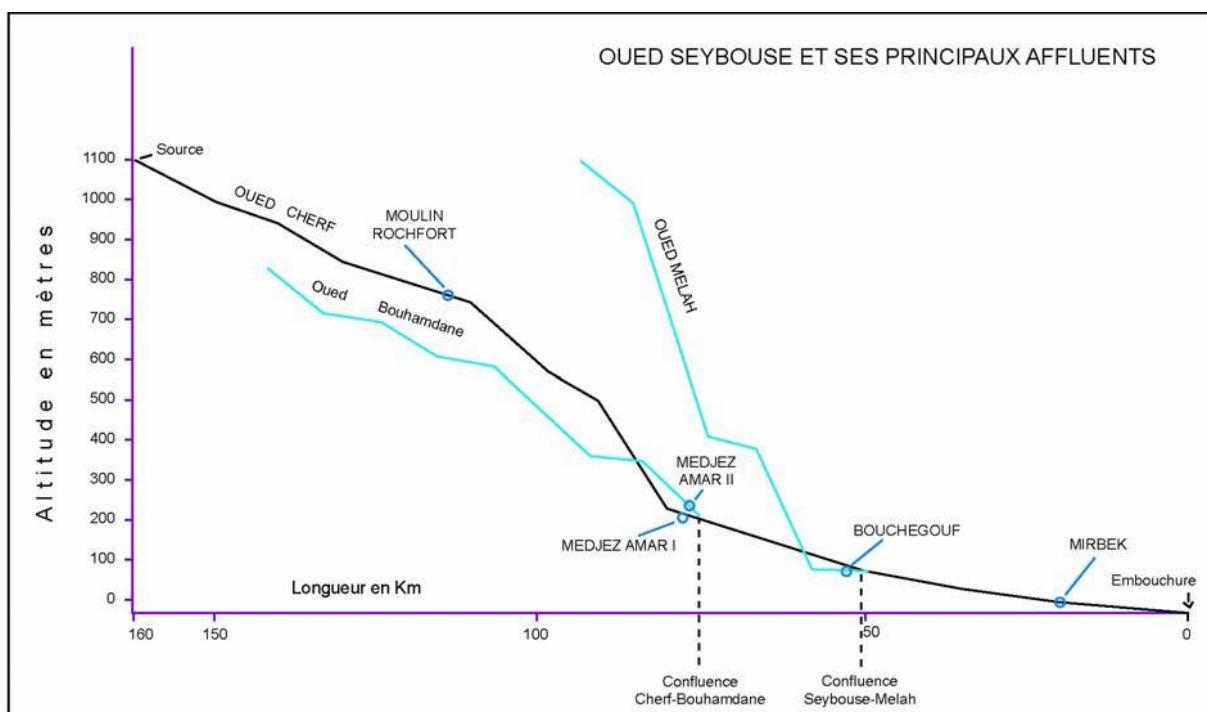


Fig.17: Profil en long de l'Oued Seybouse (d'après Ghachi A., 1986)

La majorité des apports de l'oued Bouhamdane sont captés par le barrage de Hammam Debagh. L'oued Cherf supérieur est exploité par le barrage de Foum El Khanga. Les données du contexte morphostructural du bassin se traduisent par la présence d'aquifères superposés dans les formations Mio-plioquaternaires (haut Cherf) et par des nappes d'eau libres dans les formations plioquaternaires des plaines de Guelma-Bouche gouf. Un système de nappes superposées (un niveau d'alluvions grossières et un niveau relativement profond de calcaires lacustres) est intensivement exploité dans la basse Seybouse, plus précisément la plaine Ouest d'Annaba (Ghachi. A, 1986).

Les formations de calcaires karstiques (sous bassin du bas Cherf, Tamlouka) donnent lieu à l'émergence de sources (à l'exemple de la source d'Ain Arko) et renferment d'importantes ressources, exploitées par forages).

3.2 Présentation des données :

3.2.1 Description de la base de données :

L'observation des évènements de la nature est un outil essentiel à la connaissance et à la compréhension des phénomènes naturels. Les mesures de ces évènements en général et en particulier en hydrologie constituent des éléments de référence indispensables pour toute l'étude. La quantification des paramètres hydro climatiques constitue un préalable à l'estimation des ressources en eau. Il ya un problème des lacunes d'observation et de leur fiabilité dans l'étude des précipitations en Algérie. Ceci a été mis en évidence dans d'autres études hydrologiques et climatologiques (Mebarki, 1982 et 2005; A.N.R.H., 1993 ; Anser, 1998 ; Touaibia et al, 2006 ; Medjerab et Henia, 2005). La faible densité du réseau pluviométrique dans les zones montagneuses constitue un handicap supplémentaire aux études.

Afin d'avoir un moyen fiable de comparaison et dans le but d'intégrer un ensemble de stations qui offrent des données de bonne qualité, il est nécessaire de se baser sur quelques critères pour éliminer les stations défectueuses. Les critères qui ont été adoptés sont :

- Continuité des séries des stations retenues sur une période suffisamment longue
- Homogénéité des séries à étudier;
- Synchronisation des séries;
- Stations issues de réseaux professionnels ;
- Représentativité des stations pour toutes les grandes régions géographiques

Tentés d'intégrer le plus grand nombre de stations, et ce pour offrir une large séries d'observations. Mais, après vérification des stations, nous avons constaté les difficultés suivantes :

- Le problème des ruptures d'observations qui affectent un certain nombre de stations
- Les données manquantes
- L'inégale répartition spatiale des stations. En effet, la majorité des stations sont implantées dans le septentrional, d'autre part, la plupart des stations ont été placées dans les

Chapitre 3

régions, de plaine et de faible altitude, contrairement aux régions montagneuses qui ne disposent que d'un nombre limité de stations

Les données pluviométriques proviennent des deux établissements responsables du réseau pluviométrique en Algérie, à savoir l'Agence Nationale des Ressources hydrauliques (ANRH) La localisation des stations est présentée dans le tableau1.

Le bassin est équipé par 13 stations pluviométriques gérées par l'Agence Nationale des Ressources hydrauliques (ANRH) toutes retenues dans notre étude. La Série d'observations prise en considération s'étale sur 42 années (1970- 2011). Nous avons retenu seulement les stations possédant une série de données la plus complète possible. Nous avons conservé une répartition géographique de ces stations de manière à couvrir la plus grande superficie du Nord Est de l'Algérie.

Table1 : stations pluviométriques retenues pour l'étude

Stations	x	y	Code
Pont Bouchet	387676.538	4075860.31	140631
Ain Barda	374436.463	4061429.1	160606
Nechmeya	366951.782	4052869.16	140605
Boukamouza	387853.44	4049493.79	140607
Bouchegouf	384626.796	4035289.75	140505
Guelma (Fendjel)	360987.538	4035719.82	140412
Hiliopolis	361718.01	4041294.87	140403
Machrouha	396191.581	4024729.98	140502
El Karma	381949.053	4069154.17	140609
Medjaz Amar	349708.384	4035499.41	140313
Ain Makhlof	344190.352	4012483.12	140205
Charef (EL Khenga)	357146.418	3990797.14	140105
Bordjsabath	324651.829	4032145.71	140302

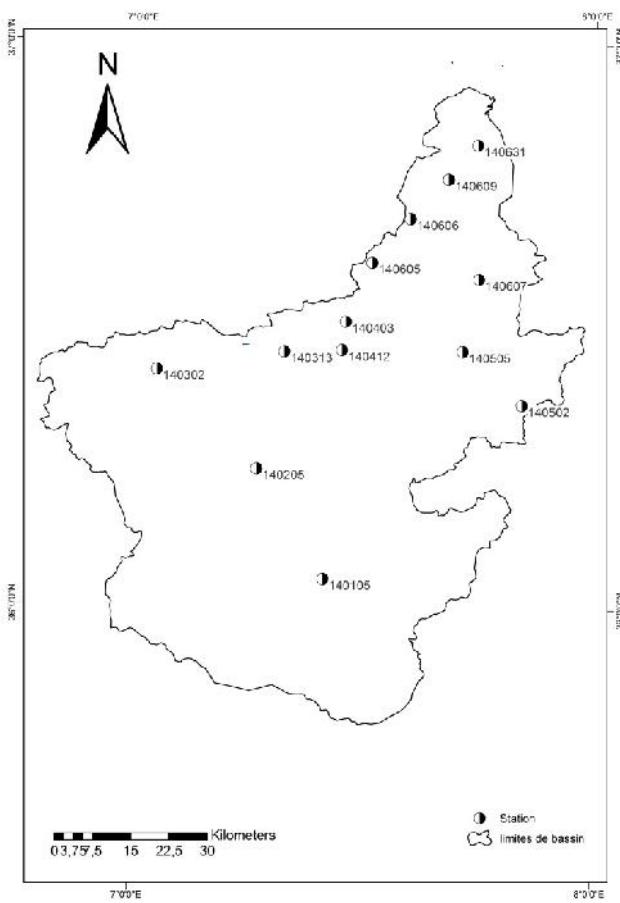


Fig.18: Localisation des stations météorologiques dans la région d'étude

3.2.2 Etude d'homogénéité des séries :

Diverses techniques d'homogénéisation ont été développées pour accommoder différents types de facteurs tels que la variable à homogénéiser, la variabilité spatiale, et temporelle des données selon l'endroit où les stations sont situées, la longueur des séries et le nombre de données manquantes, les métadonnées disponibles et la densité du réseau d'observation. Les techniques d'homogénéisation varient également selon l'objectif pour lequel on les applique. Malgré la grande diversité des méthodes d'homogénéisation, elles peuvent néanmoins être classifiées en deux catégories principales qui les rejoignent toutes:

Méthodes subjectives ou objectives. Lorsque l'emplacement d'une discontinuité est détecté à l'œil nu sur un graphique, la méthode appartient à la classe subjective même si des tests statistiques sont appliqués par la suite. Par contre, les méthodes objectives ne dépendent pas du jugement de l'utilisateur pour localiser les inhomogénéités. Les méthodes bayésiennes, qui seront présentées plus loin, pourraient être considérées comme subjectives ou objectives selon

qu'elles incorporent ou non l'opinion du modalisateur par le biais d'une distribution a priori informative.

L'utilisateur des données doit connaître l'historique des stations d'observations ce qui permettra d'expliquer les causes de l'hétérogénéité lorsqu'elle existe. Cet historique comprend le nom de la station, les coordonnées, les périodes et le personnel d'exploitation et les détails sur son équipement.

Avant d'aborder l'étude de l'homogénéité de nos séries et donner les résultats, nous allons présenter la méthode traitant cette question. Il existe des tests graphiques et numériques par exemple :

3.2.3 Tests graphiques :

3.2.3.1 Le simple cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter; une fois que les valeurs sont cumulées, il faut les mettre en ordonnées et le temps en abscisse. À partir de cumuls en fonction du temps on dispose d'un nuage de points, ces derniers fluctuent autour d'une droite. Si on constate une cassure de la droite, on conclut que la série correspondante présente une tendance, des observations erronées ou des valeurs exceptionnelles. Lorsque la cassure est nette, on peut par simple lecture sur le graphique déterminer l'époque où s'est manifestée la tendance et contrôler dans les documents les causes de cette tendance.

La méthode du simple cumul ne permet pas de différentier dans le cas où l'on observerait une tendance, celle qui est propre à la station (hétérogénéité) d'une tendance climatique. Nous avons relégué ce test de notre étude, pour cette raison.

3.2.3.2 Le double cumul

Le principe de la méthode des doubles cumuls consiste à tracer progressivement le cumul d'un paramètre du poste à tester en fonction de celui du même paramètre de la série de référence. Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité.

3.2.3.3 La méthode du cumul des résidus

Dans la méthode du cumul des résidus, on calcule d'abord la régression entre la série étudiée et la série de référence. On peut alors former la série des résidus (le résidu étant l'écart entre la valeur vraie et la valeur estimée par régression). On effectue ensuite la somme de ces résidus que l'on pointe sur un graphe en fonction du temps. Si la série testée est homogène, la distribution de ces résidus est complètement aléatoire. Par contre, si la série est hétérogène, la

courbe présente des portions anormalement croissantes ou décroissantes. Si elle sort d'une ellipse de significativité définie pour un intervalle de confiance donné, on peut conclure qu'une hétérogénéité est détectée à la cassure de la courbe.

Tests numériques : Méthodes statistiques

Pour détecter l'existence d'une éventuelle tendance dans les séries de données pluviométriques, les tests non paramétriques de Spearman et Mann-Kendall, qui permettent de franchir des contraintes imposées par d'autres méthodes paramétriques et qui ont montré leur efficacité dans ce genre d'application. Afin de consolider les résultats de ces deux tests, nous avons utilisé le test de Pettitt, qui présente la particularité de localiser le moment de la rupture de la moyenne au sein de la série avec un niveau de signification qui traduit l'importance réelle du changement détecté. Ces calculs ont été appliqués aux données annuelles.

Test de Pettitt

Pour confirmer les résultats obtenus par la méthode classique, nous avons appliqué l'approche de Pettitt qui est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. Ainsi, l'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (pas de cassure 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. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par:

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

Où $D_{ij} = sgn(x_i - x_j)$ avec $sgn(d) = 1$ si $d > 0$; 0 si $d = 0$

et -1 si $d < 0$, avec $(d = x_i - x_j)$.

Si l'hypothèse nulle n'est rejetée, une estimation de la date de la cassure est donnée par l'instant

t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

Test de Buishand pour l'homogénéité :

Le test de (Buishand, 1982) peut être utilisé sur des variables suivant des distributions quelconques. Néanmoins ses propriétés ont été particulièrement étudiées pour le cas normal. L'article Buishand se concentre sur le cas du test bilatéral, mais pour la statistique Q présentée ci-dessous le cas unilatéral est aussi possible. Buishand a développé une seconde statistique

R, pour laquelle seule une hypothèse bilatérale est possible. Dans le cas de la statistique Q, les hypothèses nulles et alternatives sont définies par :

- H0 : les T variables suivent une ou plusieurs distributions ayant une même moyenne.
- Test bilatéral : Ha : Il existe un temps t à partir duquel les variables changent de moyenne.
- Test unilatéral à gauche : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables diminue de D.
- Test unilatéral à droite : Ha : Il existe un temps t à partir duquel la moyenne des variables augmente de D.

Traitement des données pluviométriques :

L'un des défis de la communauté scientifique est la résolution du problème d'homogénéité des séries chronologiques observées dans certaines stations météorologiques. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes ; la méthode classique des doubles cumuls et l'application du test d'homogénéité de Pettitt à un intervalle de confiance 95 % (Wang et al. 2007). L'ajustement des séries non homogènes a été effectué par le logiciel XLSTAT.

Généralement on utilise la méthode des doubles cumuls (Musy et Higy, 2003), dans le but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une hétérogénéité au sein d'une série pluviométrique d'une station donnée.

L'utilisation de cette méthode requiert la disponibilité d'une station de référence dite station témoin (X) dont les valeurs sont supposées complètes et homogènes, avec lesquelles on va comparer les valeurs de la station qu'on veut contrôler (Y), il est à noter que la comparaison ne se fait pas entre les valeurs observées, mais entre leur cumul; un effet de lissage est obtenu au cours de la comparaison, en fonction de la variable temps choisie (année, saison, mois, décade). Pour mieux illustrer cette méthode, nous donnons en exemple, les deux stations d'AIN BERDA et PONT BOUCHET. Sur le graphique cartésien (**figure19**), nous portons en abscisse les totaux annuels des précipitations de la station de référence (AIN BERDA) et en ordonnée ceux de PONT BOUCHET

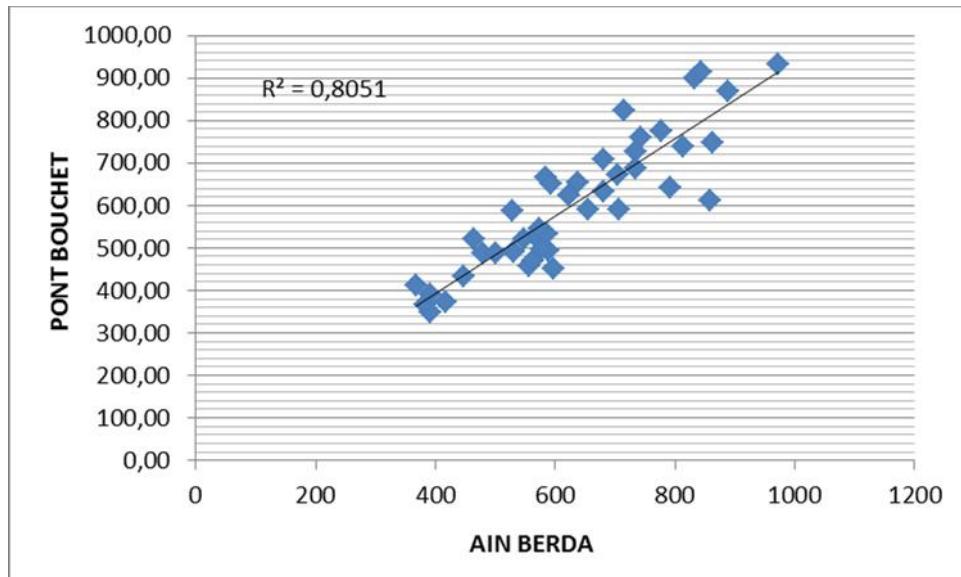
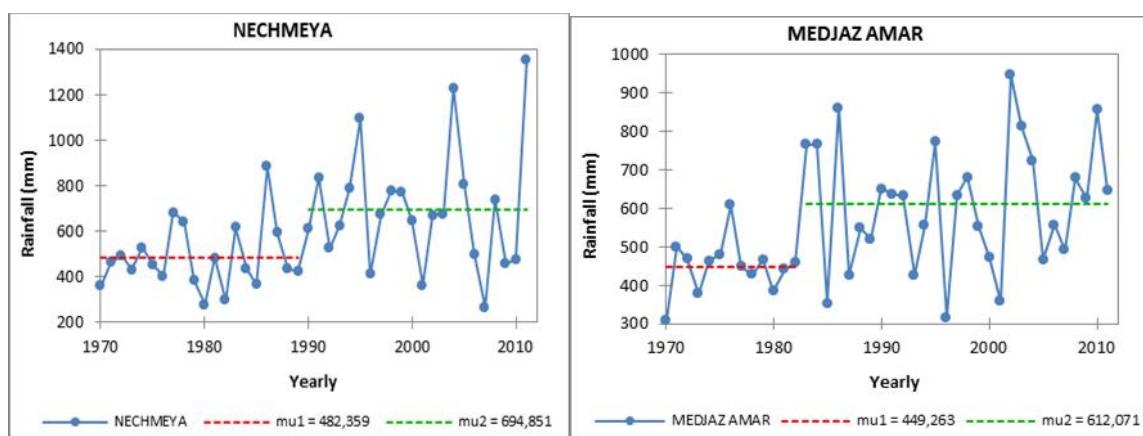


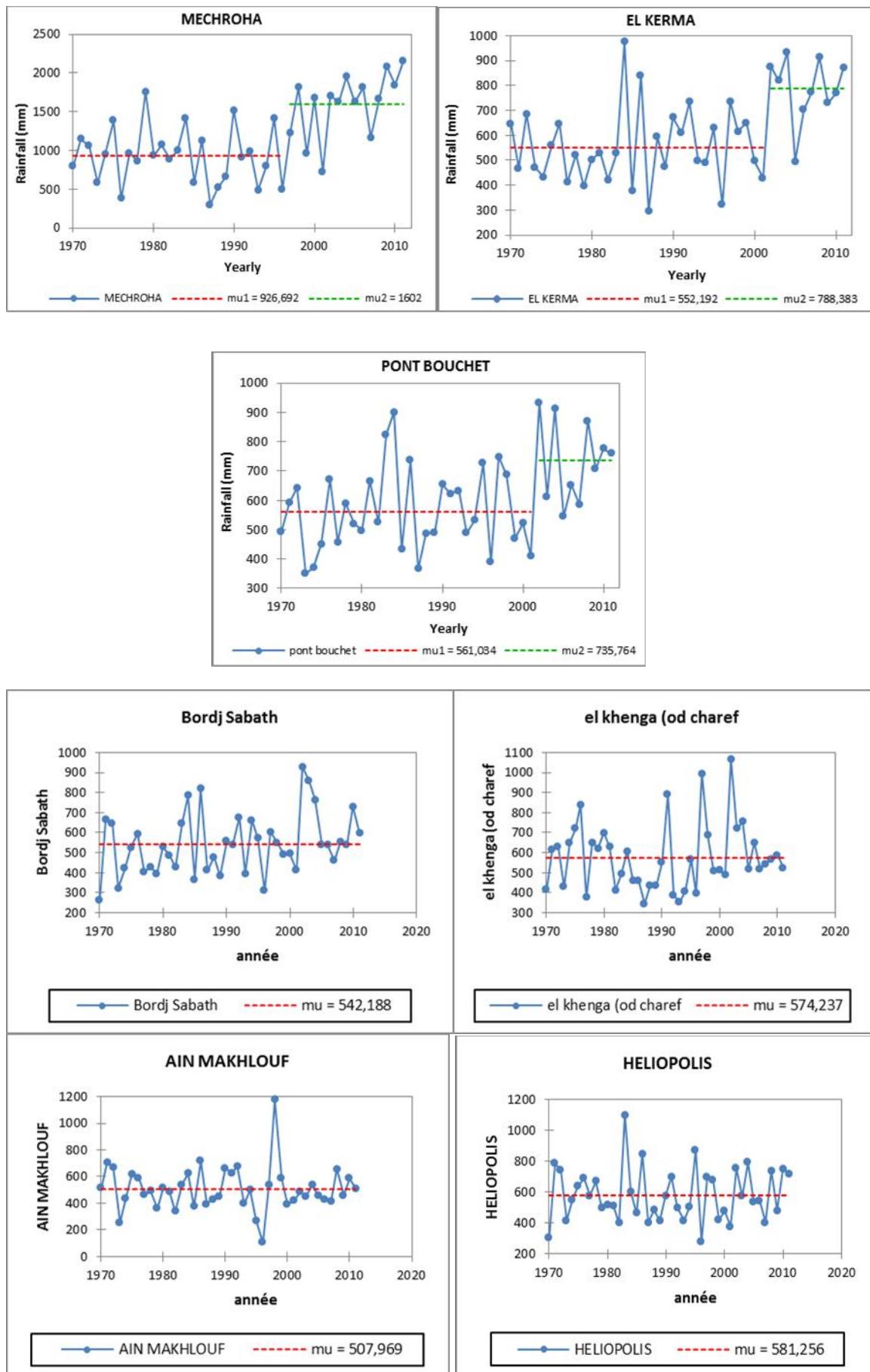
Fig.19: Le contrôle des totaux annuels des précipitations par la méthode des doubles cumuls

Test d'homogénéité : Test de Pettitt

Les résultats montrent que les séries pluviométriques moyennes annuelles des stations de pont Bouchet, El kerma, Mechrouha, Medjaz Ammar et Nechmaya ont des points de changement significatif entre 1982 et 2001 (**Fig .20**), l'hypothèse d'homogénéité est rejetée pour ces stations à un niveau de 5% d'importance. Le test a également indiqué que l'hypothèse d'homogénéité est valable dans les autres stations puisque des points de changement non significatifs ont été détectés dans leur série de précipitations (valeur p = 0,05).



Chapitre 3



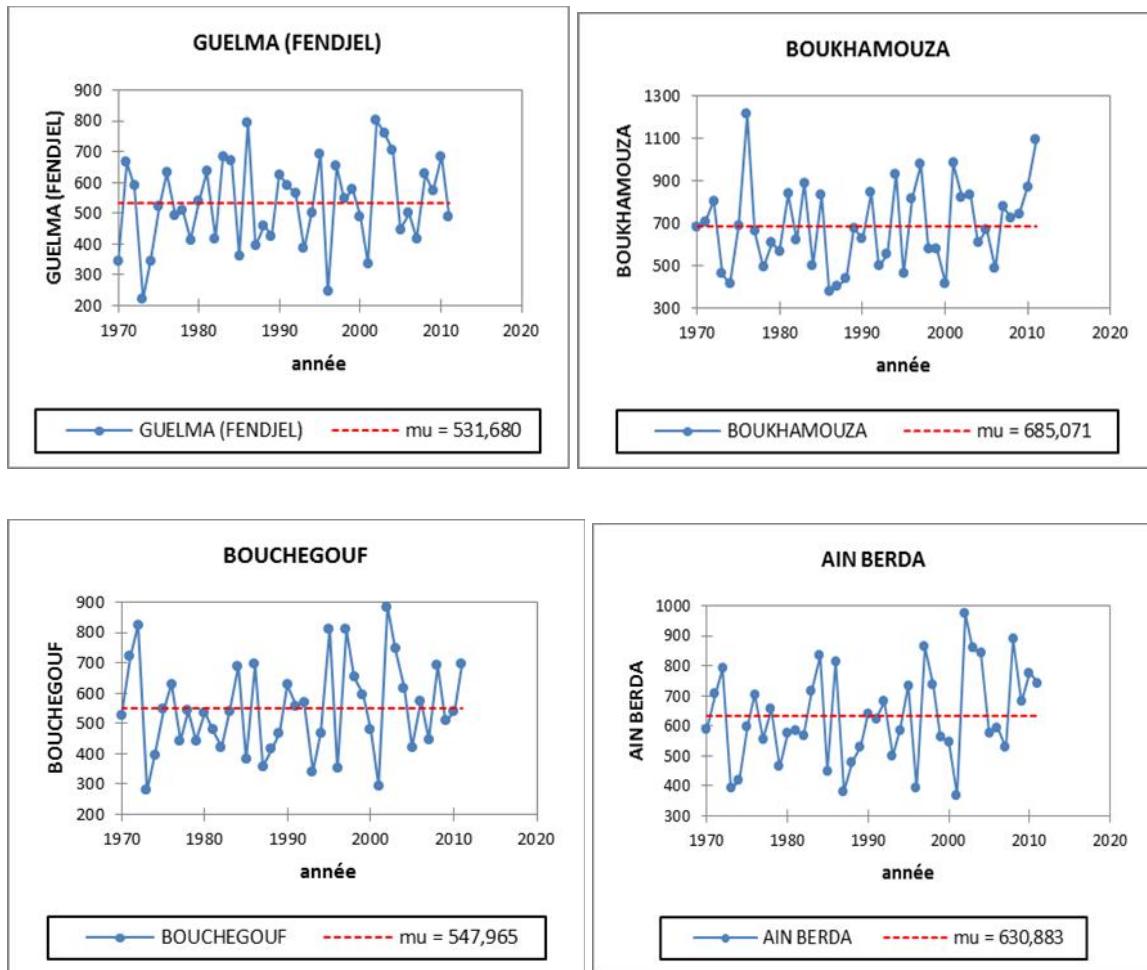


Fig. 20 : Test de Pettitt d'homogénéisation à 99% de confiance appliqué aux stations

Tableau 2: les résultats du test de point de changement de Pettitt effectué sur la pluviométrie annuelle moyenne des 13 stations du bassin hydrographique de Seybouse.

Station	p value	Observation
Pont Bouchet	0.0472	Non homogène
Ainberda	0.1255	Homogène
Bouchegouf	0.3865	Homogène
Boukamouza	0.2941	Homogène
El Kerma	0.0044	Non homogène
Guelma	0.6165	Homogène
Heliopolis	0.7774	Homogène
Mechroha	0.0001	Non homogène
Medjaz Amar	0.0116	Non homogène
Nechmeya	0.0113	Non homogène

Chapitre 3

AinMakhlouf	0.9056	Homogène
Charef	0.1645	Homogène
Bordjsabath	0.1063	Homogène

La non homogénéité des pluviométriques résulte fréquemment des causes suivantes :

a- causes d'origine non climatique qui résultent vraisemblablement des facteurs suivants :

- Un mauvais état ou la défectuosité des pluviomètres ;
- Un changement du matériel d'observation, ou le changement d'observateur ;
- Changement du site et des conditions topographiques locales ;
- L'expansion urbaine et le développement des activités humaines qui s'y rattachent.

b- Causes d'origine climatique qui résultent de deux facteurs essentiels :

- Des modifications éventuelles de l'environnement local à cause de la déforestation, variation climatique... etc.
- Le non homogénéité des données peut aussi résulter des changements internes du climat et du microclimat.

Chapitre 4

Présentation étude des caractéristiques des pluies et caractérisation de la sécheresse

4.1 PARTIE 1 : étude des caractéristiques des pluies

4.1.1 Approches statistiques et analyses des séries pluviométriques :

En Algérie, les changements climatiques de ces dernières décennies ont eu une influence négative sur la ressource hydraulique (recharge des nappes et remplissage des barrages-réservoirs) et sur le rendement agricole. Ces changements poussent actuellement les décideurs à revoir les types de cultures qui peuvent s'adapter à la nouvelle donne climatologique de certaines régions du pays.

Plusieurs paramètres statistiques peuvent être utilisés pour mettre en évidence la variabilité spatiale des précipitations annuelles aux différents pas de temps et à diverses régions du globe.

Parmi les plus utilisés on peut citer le paramètre de dispersion absolue : l'écart-type, et le paramètre de dispersion relative : le coefficient de variation (Cv). Ces indices de dispersion permettent, en effet, de quantifier l'ampleur de l'irrégularité pluviométrique et de mettre en évidence ses aspects spatiaux. En outre, ils permettent de faire des comparaisons interrégionales, notamment, à l'aide du coefficient de variation (Saloui, 1996)

Ainsi, pour mieux saisir l'intensité de la variabilité pluviométrique et ses nuances régionales, nous nous basons sur ces paramètres :

a- L'écart-type () :

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

Où Pi : Cumul annuel de l'année i

\bar{P} : Moyenne des pluies annuelles

N : Nombre d'année

L'écart-type, souvent noté "Sigma" (), 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 Cv :

$$C_v = \frac{\sigma}{p} \times 100$$

C'est une valeur sans dimension : par le rapport d'une caractéristique de dispersion absolue à une caractéristique de valeur centrale. La variabilité doit être positive et exprimée en fonction d'une origine non arbitraire (Saloui, 1996)

L'une des caractéristiques principales de la pluviométrie, dans notre région, est sa grande Variabilité interannuelle. En effet, d'une année à l'autre le total annuel peut varier fortement. Ceci nous a conduits à une étude détaillée de la variabilité interannuelle des précipitations.

Dans cette partie, nous avons axé notre travail sur 13 stations qui seront décrites région d'étude.

4.1.2 La variabilité absolue des pluies annuelles :

Afin de calculer la dispersion absolue et d'étudier la variabilité structurelle des cumuls pluviométriques annuels, nous avons employé en premier temps l'écart-type. Les résultats issus de l'application de cet indicateur sont notés sur le **tableau 3**.

Sur la majorité du territoire de bassin, les valeurs annuelles absolues de l'écart-type révèlent une grande dispersion absolue des pluies annuelles. Elles varient entre 140 mm à Guelma et 498 mm à Mechroha. Ces valeurs sont directement proportionnelles aux totaux annuels, ce qui indique que la variabilité absolue est plus importante quand les cumuls pluviométriques sont élevés.

L'analyse de ce paramètre dans les différentes régions de basin montre que l'intensité et l'ampleur de l'irrégularité absolue des pluies ne sont pas uniformes. En effet, c'est une forte variabilité absolue (**fig.21**)

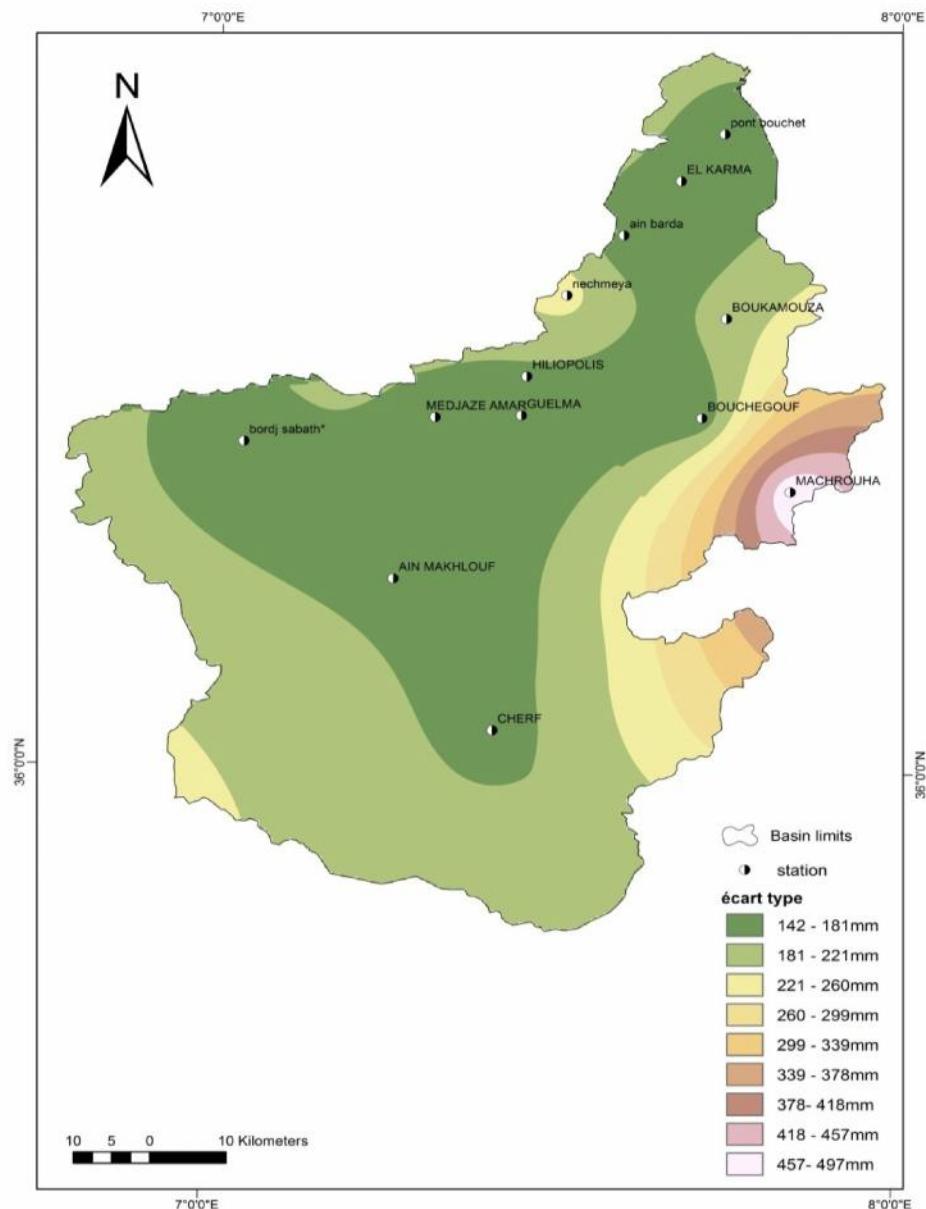


Fig.21 : Répartition spatiale de la variabilité absolue des pluies annuelles

4.1.3 La variabilité relative des pluies annuelles :

Pour l'ensemble des stations retenues, le coefficient de variation annuelle est compris entre 24% à la station d'AIN Berda et 43 % à la station de Mechrouha. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les stations de la septentrionale, Pont Bouchet 26 % et Bouchegeouf 27 %. En revanche, les valeurs les plus élevées sont observées dans les stations Mechrouha et Nechmeya où le coefficient de variation est de 43% et 40% respectivement, alors qu'il varie de 24% et 33% aux autres stations. La moyenne des totaux pluviométriques annuels oscille à son tour entre 507,97 mm et 1167,96 mm à la station d'Ain makhlof et à la station Mechrouha de respectivement.

Tableau 3: caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles

Station	pm moyenne (mm)	Médiane (mm)	Minimum (mm)	Maximum (mm)	écart type (mm)	coefficient de variation (%)	coefficient d'asymétrie
Pont Bouchet	602,64	590,40	349,64	933,60	155,84	26	0,37
AIN Berda	630,88	595,80	368,20	973,00	153,14	24	0,22
Bouchegouf	547,96	537,65	279,30	884,00	150,22	27	0,42
Boukamouza	685,07	675,40	380,50	1212,91	198,55	29	0,49
EL Kerma	608,43	601,54	296,30	976,08	174,97	29	0,21
Guelma	531,68	530,00	222,60	802,00	141,95	27	0,00
Heliopolis	581,26	547,05	279,10	1100,20	170,42	29	0,85
Mechroha	1167,96	1066,40	298,60	2158,24	498,30	43	0,10
Medjaz Amar	561,68	534,00	309,10	946,40	159,01	28	0,40
Nechmeya	593,66	527,17	264,95	1353,46	239,79	40	1,10
Ainmakhlouf	507,97	490,60	107,19	1176,10	166,03	33	1,56
Charef	574,24	546,03	343,90	1065,60	165,87	29	1,14
Bordjsabath	542,19	538,75	264,30	928,50	151,70	28	0,76

4.1.4 Évolution temporelle des précipitations annuelles :

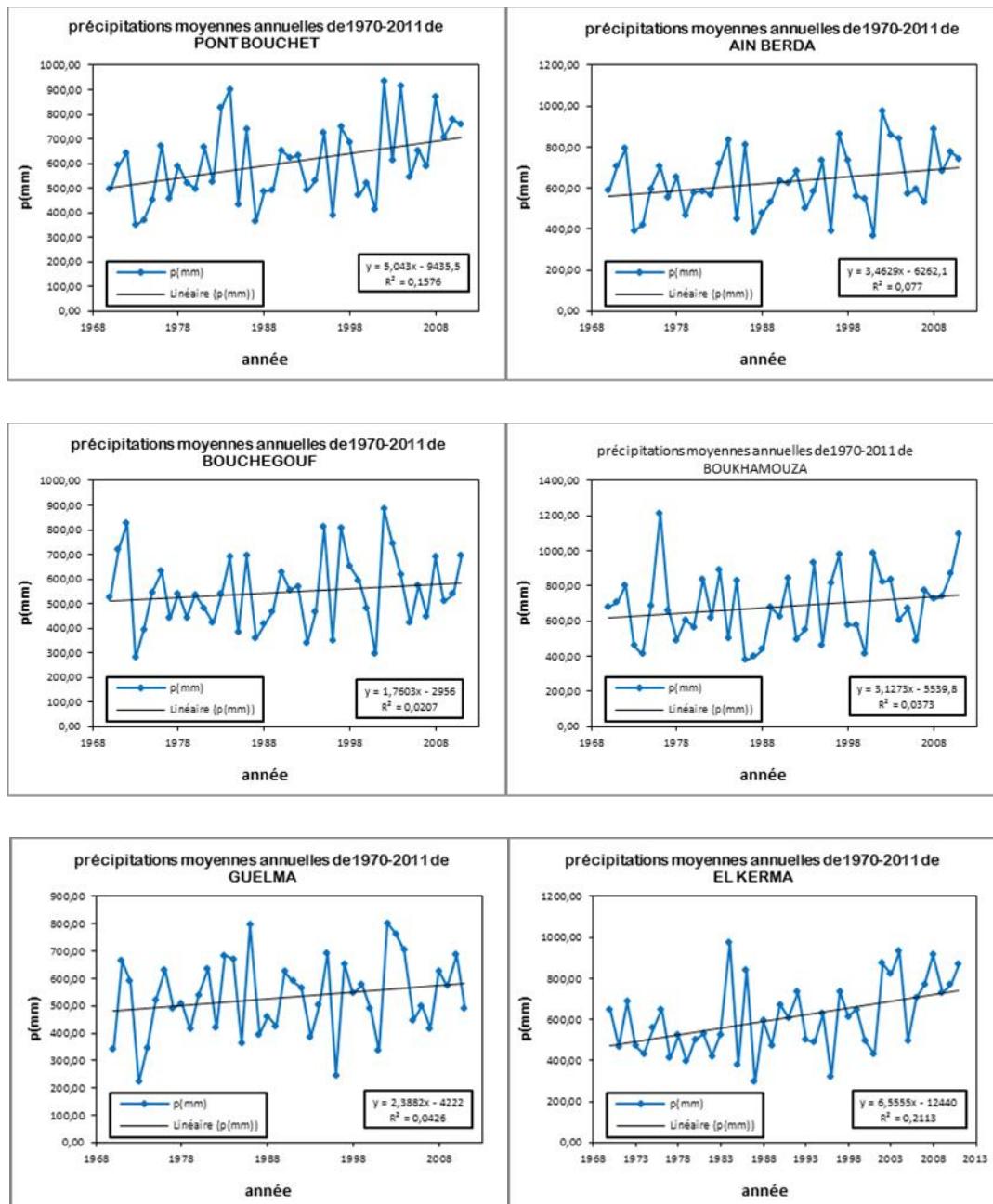
L'analyse temporelle des précipitations se fait à partir des représentations graphiques l'évolution des précipitations interannuelles à 13 stations, le basin entre 1970–2011 nous illustre les variations des pluies annuelles et l'analyse des valeurs moyennes qui fait apparaître une inégalité dans la distribution spatiale de la pluviométrie, cette fluctuation caractéristique dans la zone. Cette période fut marquée par deux périodes : les années 70 des années déficitaires on y remarque une augmentation de la période 1995-2011 périodes de précipitations.

Pour une analyse plus détaillée, nous allons caractériser la variabilité interannuelle par les variables des totaux annuels. La figure22 représente cette variabilité interannuelle des précipitations à 13 station pour la période 1970-2011, on y remarque la concordance des années déficitaires des stations pont bouchet (1973-1985-1987-1996-2001), AIN BERDA

Chapitre 4

(1973-1985-1987-1996-2001), BOUCHEGOUF (1973-1985-1987-1993-1996-2001), BOUKHAMOUZA (1974-1986-1995-2000), el kerma (1985-1987-1996), GUELMA (1973-1996-2001), HELIOPOLIS (1982-1996), MECHROHA (1976-1987-1993-1996), MEDJAZ AMAR (1985-1996-2001), nechmeya (1980-1996-2001-2007), AIN MAKHLOUF (1973-1996) el khenga (1977-1987-1993) et Bordj Sabath (1973-1985-1996). Il est à remarquer aussi que chacune des stations représente un record de déficit.

Nous remarquons que les années 1973-1985-1996 sont les années les plus déficitaires pour toute la zone d'étude. Ces graphiques confirment l'apparition et la persistance d'une sécheresse durant les deux décennies 70 et 80.



Chapitre 4

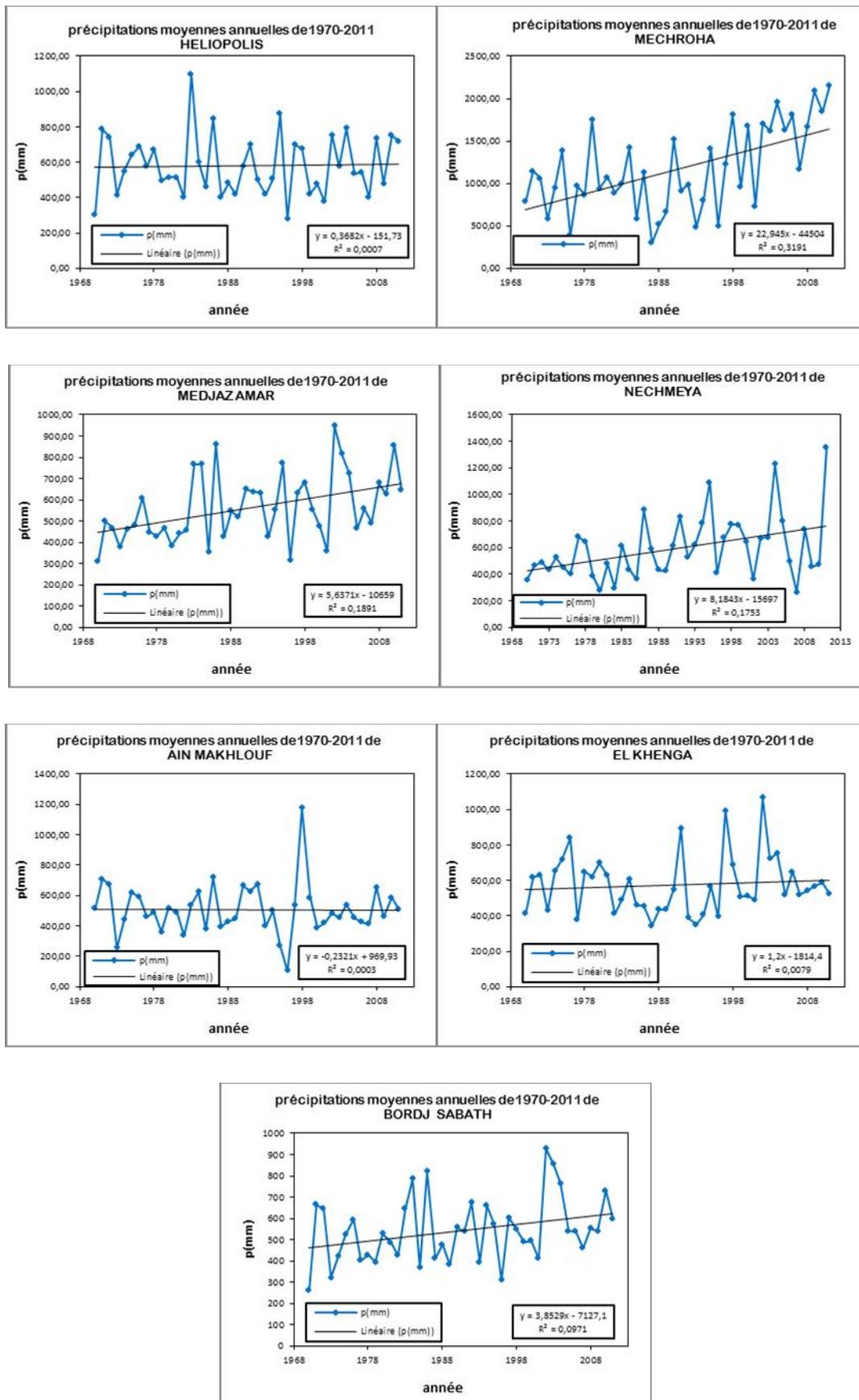


Fig.22 : Évolution des précipitations annuelles dans les stations climatiques au cours de différentes périodes

4.1.5 Variabilité et tendances pluviométriques :

Deux tests statistiques et l'analyse statistique ont été appliqués aux saisons : mesurer leur degré de significativité et détecter les périodes de ruptures de stationnarité, on a l'ellipse de contrôle de Pettitt le test et l'analyse de régression linéaire de Mann-Kendall. Le premier était appliqué afin d'identifier les violations en série pluviométriques, afin de détecter les brusques changements de précipitations qui signifient les valeurs de chaque station météorologique. Déjà le second test identifie les tendances dans les séries chronologiques à long terme. Je veux dire, s'il augmente ou diminue les tendances des quantités de précipitations pour chaque station de chaque année ou de façon saisonnière. La troisième analyse identifie des changements subtils les totaux annuels des précipitations à long terme. Les essais ont été effectués au moyen de **XLSTAT 2014** logiciels Addinsoft, la version 3.5.2014 (64 bits) vers Windows 7.

4.1.6 Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles :

L'étude a été menée par l'application de tests statistiques pour détection de "rupture" en moyenne des séries chronologiques de pluviométrie annuelle. "Rupture" doit être compris, ici, comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné (Lubès et al, 1994). Plusieurs méthodes disponibles dans la littérature permettent l'analyse de ces phénomènes dans une série chronologique.

4.1.6.1 Test de Pettitt :

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

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

où $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$, avec $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$, 0 si $X = 0$ et -1 si $X < 0$.

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$.

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de KN prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par:

$$prob(k_N \geq k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^3 + N^2}\right)$$

Pour un risque à de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment x où est observé K .

4.1.6.2 Statistique U de Buishand (Buishand , 1982,1984) :

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian (Lee et Heghinian., 1977). En supposant qu'une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par:

$$u = \frac{\sum_{K=1}^{N-1} \left(\frac{S_K^*}{D_x} \right)^2}{N(N+1)}$$

Ou :

$$S_K = \sum_{i=1}^K (X - \bar{x})$$

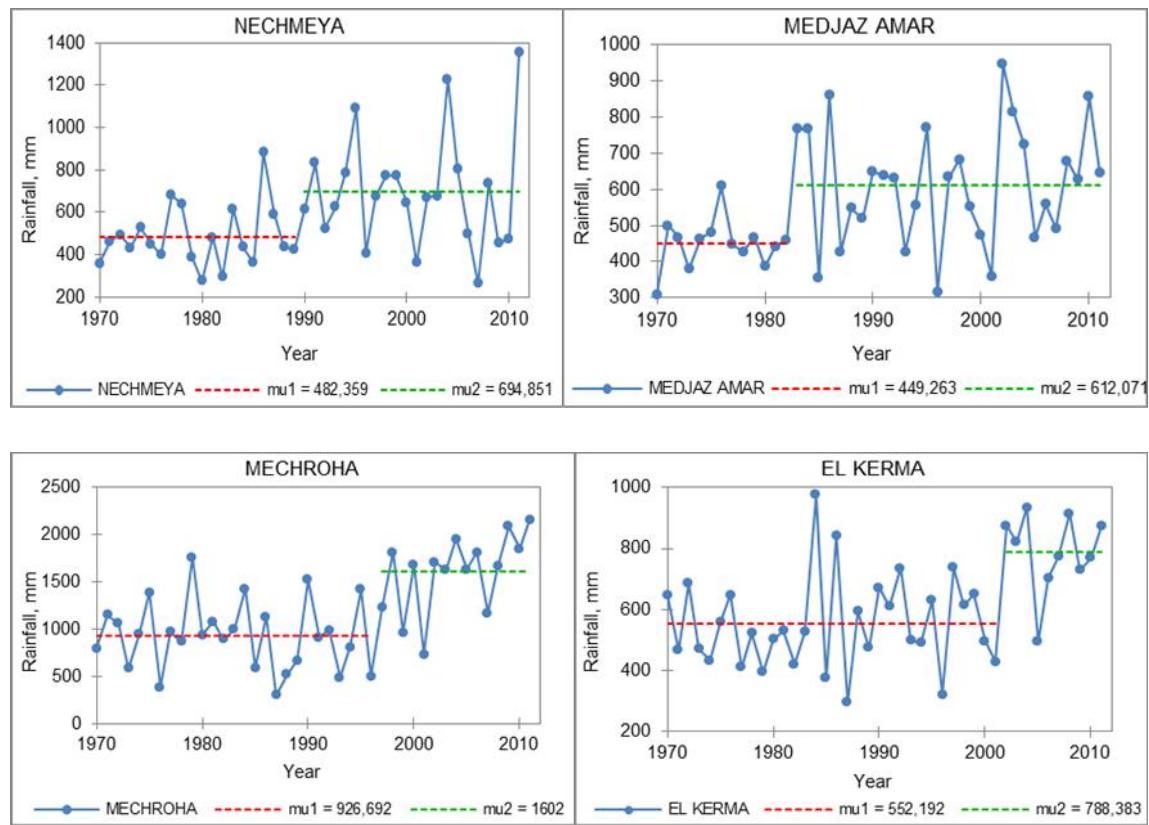
Pour $k = 1, \dots, N$ et Dx désigne l'écart type de la série.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (xi) . La variable S_k , définie au-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $k(N-k)/N-1/2$, $k=0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (xi) . 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 .

4.1.6.3 Résultats :

Les résultats du test montrent qu'une rupture (équivalente à une augmentation de la pluviométrie annuelle dans le cas présent) au sein de la série chronologique s'observe majoritairement entre 1982 et 2000 avec un niveau de signification qui varie d'un poste à un autre. Le niveau de signification traduit ici l'importance réelle ou non d'un changement de la moyenne au sein de la série pluviométrique. Les paramètres utilisés dans ces essais étaient les suivantes: Hypothèse alternative $\neq 0$; le niveau de signification de 5%; 10.0000 nombre de simulations; simulation maximale T 180 (s). Les données qui contiennent des lacunes ont été ignorées. Le test a été effectué dans toutes les stations avec plus de 20 années de données. . Sur le total des 13 stations ,5 stations rupture présentées dans la série historique et 8 station ont eu rupture positive avec une augmentation des précipitations après la date de la rupture, toutes les stations sélectionnées contenaient des ensembles de données homogènes voir le tableau ci-dessous.

Les ruptures significatives ont été El Kerma (2001), Mechroha (1996). Pont Bouchet (2001) , MEDJAZ AMAR(1982) et NECHMEYA (1989)



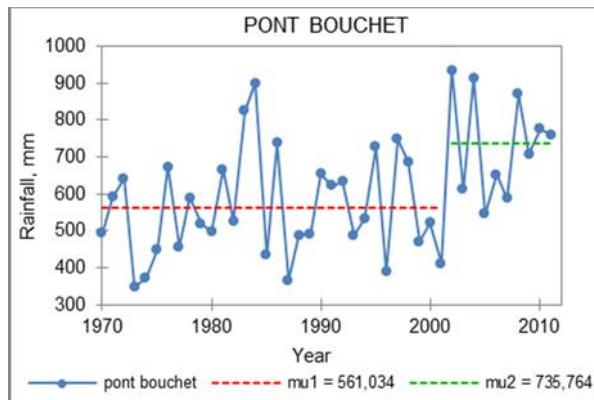


Fig.23 : Test de Pettitt. Dans ce graphique, nous voyons une pause dans la série (El Kerma , Mechroha , Pont Bouchet, MEDJAZ AMAR et d' NECHMEYA)

Le table.4 : principal dates de rupture des séries pluviométriques

n°	Station	Période d'observation	Test de Pettitt		U de Buishand	
			Dates de rupture	p-value	Dates de rupture	p-value
1	Pont Bouchet	1970-2011	2001	4,72%	2001	3,24%
2	Ain Berda	1970-2011	2001	12,55%	2001	7,90%
3	Bouchegouf	1970-2011	1994	38,65%	1994	37,18%
4	Boukamouza	1970-2011	2000	29,41%	2000	36,38%
5	El Kerma	1970-2011	2001	0,86%	2001	0,44%
6	Guelma	1970-2011	2001	61,65%	2001	49,28%
7	Heliopolis	1970-2011	2001	77,74%	2001	96,59%
8	Mechroha	1970-2011	1996	0,02%	1996	0,01%
9	Medjaz Amar	1970-2011	1982	1,16%	1982	1,67%
10	Nechmeya	1970-2011	1989	1,13%	1989	1,19%
11	AinMakhlouf	1970-2011	1992	82,53%	1996	96,62%
12	Charef	1970-2011	1996	25,75%	1996	22,18%
13	Bordj Sabath	1970-2011	2001	17,03%	2001	10,63%

Un niveau de signification du test de PETTITT a été attribué à chaque station selon la classification dressée dans le table.4. Les ruptures très significatives ont été signalées sur trois stations dont celles El Kerma (0,86%), et Mechroha (0,02%). Une rupture significative a été signalée à Pont Bouchet (4,72%) Medjaz Amar (1,16%) et

Nechmeya(1,13%), Quant aux stations d'Ain Berda(12,55%) et d'Bordj Sabath (17,03%), la rupture est peu significative.

4.1.7 Tendances des précipitations annuelles :

Pour détecter l'existence d'une éventuelle tendance dans les séries de données pluviométriques ont été utilisés les tests non paramétriques de Spearman et Mann-Kendall, qui permettent de franchir des contraintes imposées par d'autres méthodes paramétriques et qui ont montré leur efficacité dans ce genre d'application. Afin de consolider les résultats de ces tests, nous avons utilisé le test de Pettitt (Détection des ruptures), et a pente de Sen qui présente la particularité de localiser le moment de la rupture de la moyenne au sein de la série avec un niveau de signification qui traduit l'importance réelle du changement. Ces calculs ont été appliqués aux données annuelles.

4.1.7.1 tests de Mann Kendall :

Le test de Mann Kendall est un test statistique largement utilisé pour l'analyse de la tendance climatologique (Mavromatis.T, et Stathis.D ,2011) et dans les séries chronologiques hydrologiques (Yue S., Wang, C., 2004). Il y a deux avantages à utiliser pour ce test. Tout d'abord, il est un test non paramétrique et ne nécessite pas que les données soient normalement distribuées. En Seconde, le test a une faible sensibilité aux ruptures abruptes dues à des séries temporelles non homogènes (Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaee, P.H., Mohammadi, K., 2011). Toutes les données signalées comme non détectées sont incluses en leur attribuant une valeur commune qui est inférieure à la plus petite valeur mesurée dans l'ensemble de données. Selon ce test, l'Hypothèse nul H_0 suppose qu'il n'y a pas de tendance (les données sont indépendantes et aléatoires Commandé) et ceci est testé en fonction de l'hypothèse alternative H_1 , qui suppose que là-bas est une tendance. (Onoz, B., Bayazit, M., 2012).

La procédure de calcul pour le test de Mann Kendall considère les séries temporelles de n points de données et x_j et x_i comme deux sous-ensembles de données où $i = 1,2,3, \dots, n-1$ et $j = i + 1, i + 2, I + 3, \dots, n$. Les valeurs des données sont évaluées comme une série temporelle ordonnée. Chaque valeur de données est comparée à toutes les valeurs de données ultérieures. Si une valeur de données d'une période de temps ultérieure est supérieure à une valeur de données d'une période de temps antérieure, la statistique S est incrémentée de 1. D'autre part, si la valeur de données d'une période de temps ultérieure est inférieure à une valeur de données échantillonnée plus tôt, S est décrémenté par 1. Le

Chapitre 4

résultat net de tous ces incrément et décrémentions donne la valeur finale de S (Drapela, K., Drapelova, I., 2011).

La statistique de Mann-Kendall S est calculée comme suit:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sign(x_j - x_i)$$

$$sign(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{de } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{de } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{de } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

Où x_j et x_i sont les valeurs annuelles dans les années j et i, $j > i$, respectivement. Si $n < 10$, la valeur de $|S|$ est comparé directement à la distribution théorique de S dérivée par Mann et Kendall. Le test à deux tiges est utilisé. À un certain niveau de probabilité, H_0 est rejeté en faveur de H_1 si la valeur absolue de S équivaut ou dépasse une valeur spécifiée $S_{\alpha/2}$, où $S_{\alpha/2}$ est le S le plus petit qui a la probabilité inférieure à $\alpha/2$ à apparaître en cas de non tendance. Une valeur positive (négative) de S indique une tendance ascendante (descendante).

Pour $n > 10$, la statistique S est approximativement normalisée avec la moyenne et la variance comme suit:

$$E(S) = 0$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

Où: m = le nombre de groupes attachés; t_i = la taille du ième groupe lié.

La simulation de Monte Carlo a été utilisée pour évaluer la signification statistique des tendances à un niveau significatif de 5%. À ce niveau, une tendance positive est significative lorsque la valeur $p > 0,05$, et une tendance négative est significative lorsque sa valeur $p < 0,05$ (FINIGURE et al, 2016; YUE, PILON, 2004). L'hypothèse nulle H_0 soulève qu'il n'y a pas de tendance dans la série, ce qui signifie qu'elles sont homogènes (DOUGLAS et al, 2000).

4.1.7.2 SEN'S SLOPE ESTIMATOR:

L'ampleur de la tendance est estimée à l'aide d'un estimateur de pente basé sur la médiane non paramétrique proposé par (SEN, 1968) et (HIRSCH et al, 1984). La pente de Sen est donnée par l'expression suivante (SALARIJAZI et al, 2012):

$$\beta = \text{median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \text{ Pour } k < j$$

Où β est la pente entre les points de données X_j et X_k mesuré au temps j et i respectivement.

Pour évaluer la signification statistique des tendances citées auparavant, le test de Mann Kendall a été appliqué avec un niveau de confiance de 95 % (Sneyer, 1990). Les paramètres utilisés pour ce test ont été : hypothèse alternative $\neq 0$; niveau de satisfaction de 5%.

4.1.6.3 Résultats :

Les résultats du test de Mann-Kendall (**table. 5**) indiquent que l'hypothèse nulle H_0 est acceptée pour les stations d'Ain Berda, Bouchegouf, Boukamouza, Guelma, Héliopolis, Ain Makhlof et Charef (valeur $p > 0,05$), avec des magnitudes d'évolution Éga les respectivement à 0,1141, 0,3426, 0,1875, 0,2617, 0,8633, 0,7631, 0,6824. Les stations mentionnées présentent une certaine homogénéité des données pluviométriques annuelles à un niveau de signification de 5%. D'autre part, la probabilité de l'hypothèse nulle est rejetée pour les stations de pont Bouchet, El Kerma, Mechroha, Medjaz Amar, Nechmeya et Bordj Sabath avec des grandeurs de tendances égales respectivement à 0,0099, 0,0038, 0,0004, 0,0054, 0,0129 et 0,0482 . Selon les estimations de la pente de Sen à un niveau de signification de 5% (tableau), seule la station Ain Makhlof a affiché une tendance négative (-0,461). Les autres stations ont montré des tendances positives significatives allant de 0,219 (Heliopolis) à 24,844 (Mechrouha).

Selon les estimations de Sen slope à un niveau de signification de 5% (tableau5), seule la station AIN MAKHLOUF a montré une tendance négative (-0,461). Les autres stations ont montré des tendances positives significatives allant de 0,219 (HELIOPOLIS) à 24,844 (MECHROUHA).

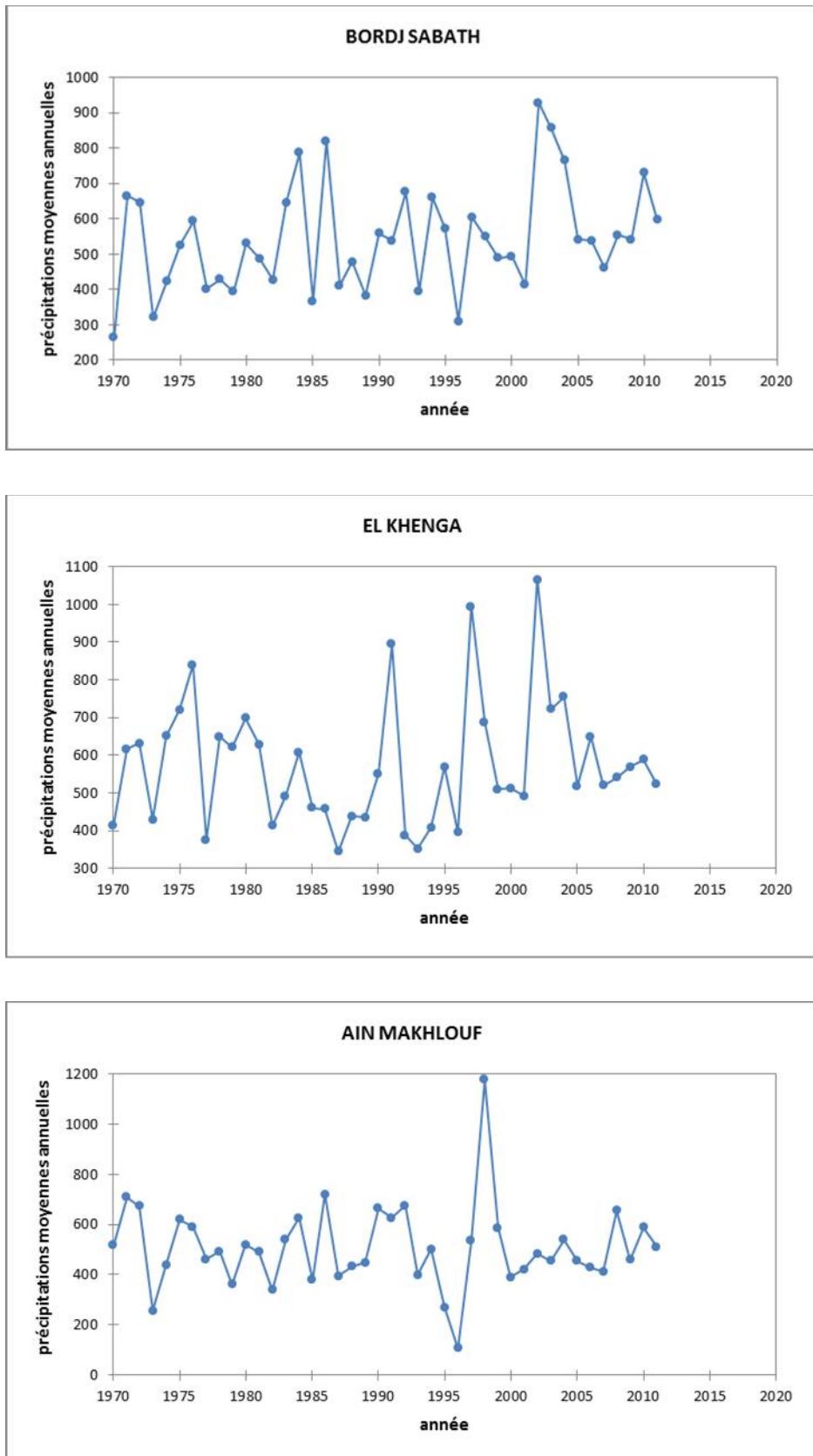
Chapitre 4

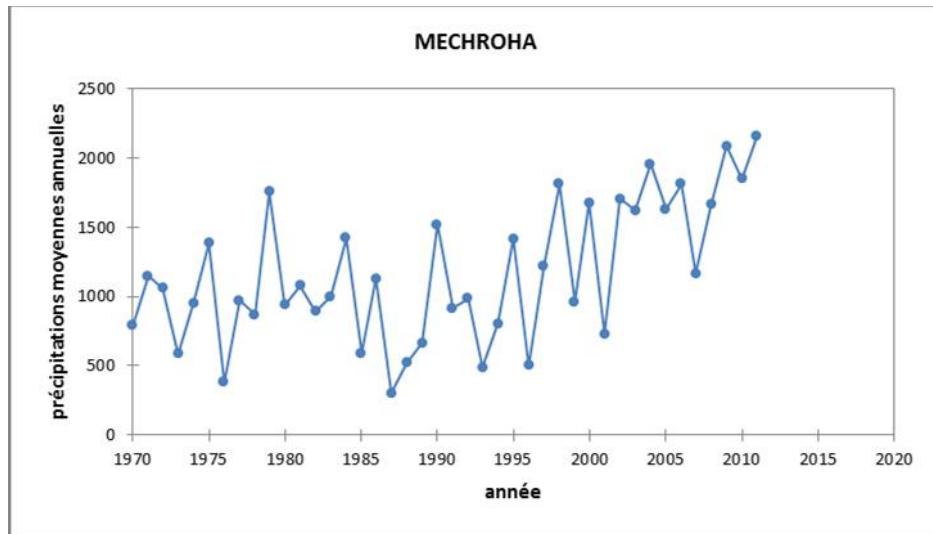
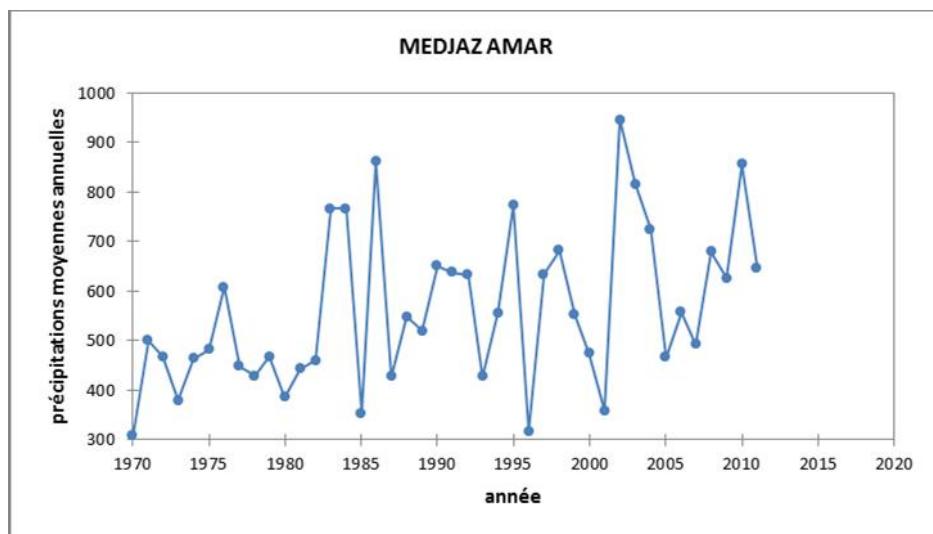
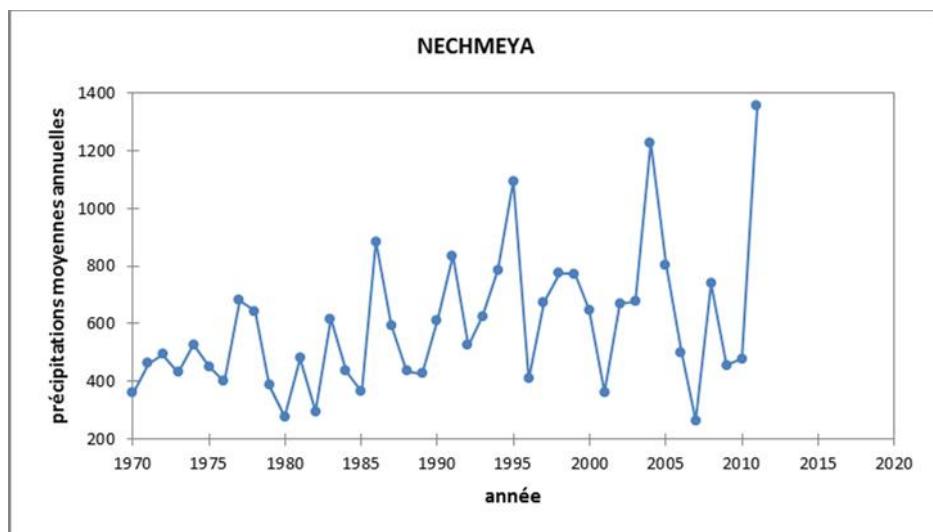
Table. 5: Application du test de Mann Kendall et Sen's slope pour les pluies annuelles au seuil de 95% ($\alpha = 0.05$)

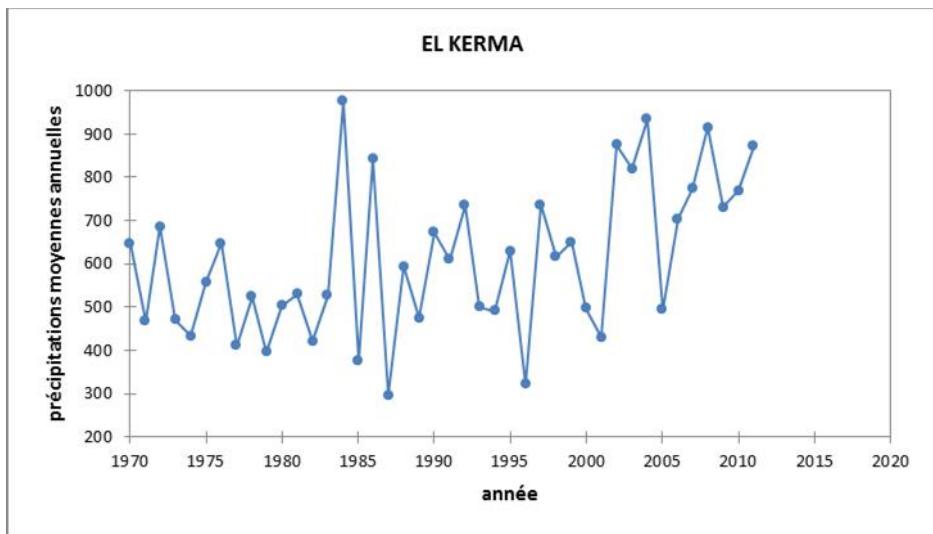
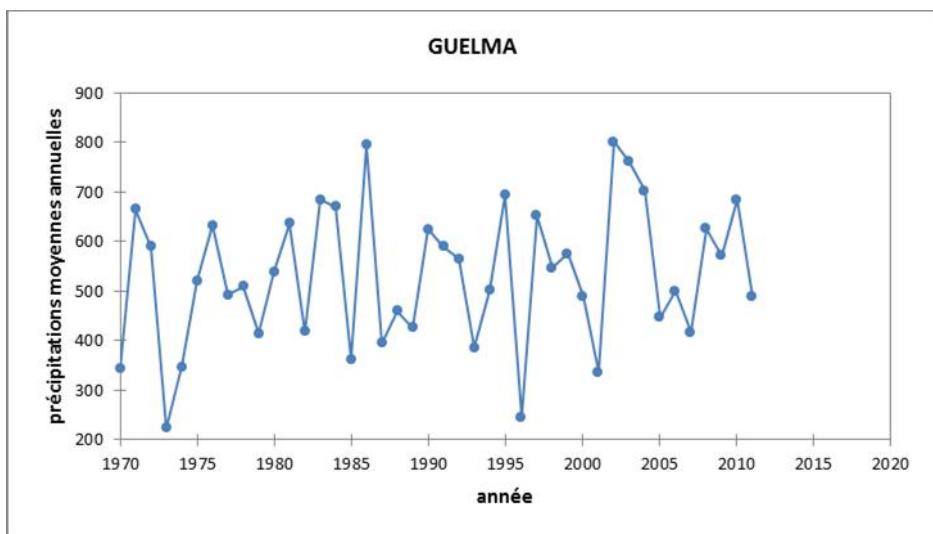
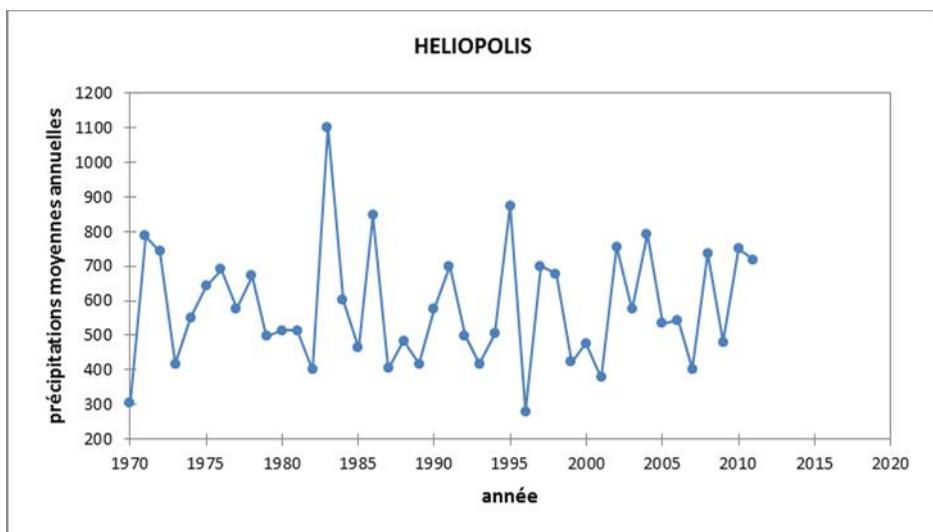
Station	Sen's slope	p value of MK	Le risque de rejeter (%)
Pont Bouchet	5.170	0.010	1.00
AinBerda	3.425	0.114	11.41
Bouchegouf	1.926	0.343	34.26
Boukamouza	4.019	0.187	18.75
ElKerma	6.921	0.004	0.38
Guelma	2.219	0.262	26.17
Heliopolis	0.219	0.863	86.33
Machrouha	24.844	0.001	0.04
Medjaz Amar	5.503	0.005	0.54
Nechmeya	6.654	0.013	1.29
Ain Makhlof	-0.461	0.763	76.31
Charef	1.145	0.682	68.24
BordjSabath	3.740	0.048	4.82

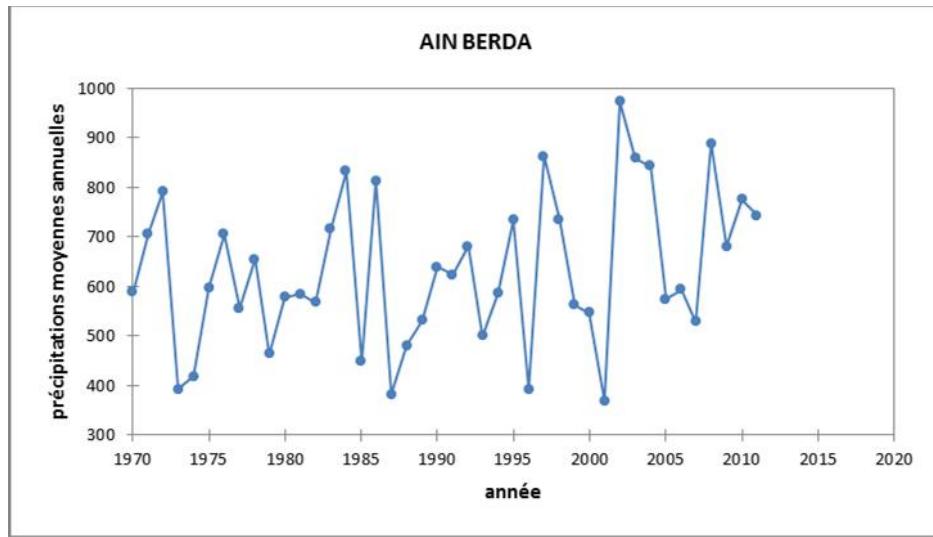
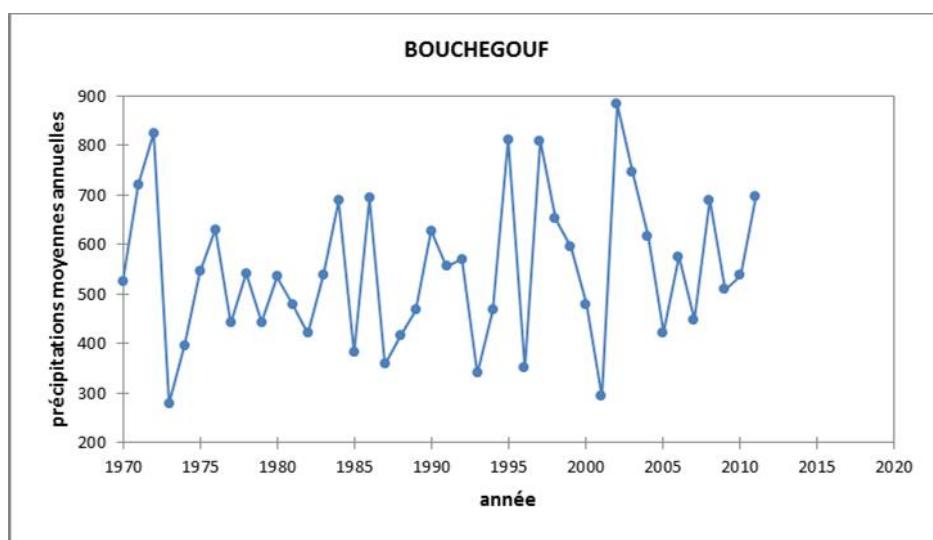
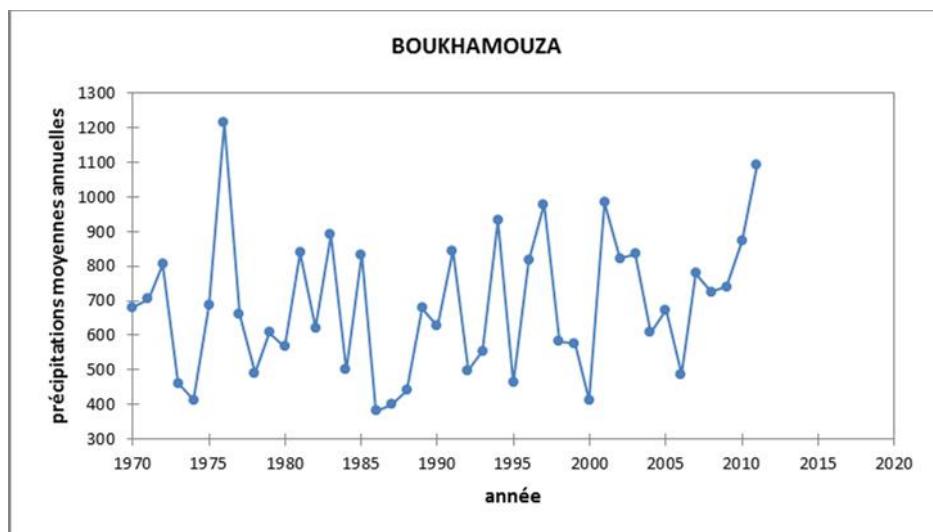
Les observations annuelles des précipitations de cette station sont soumises au test de Mann-Kendall de 13 stations (**fig.24**)

Chapitre 4









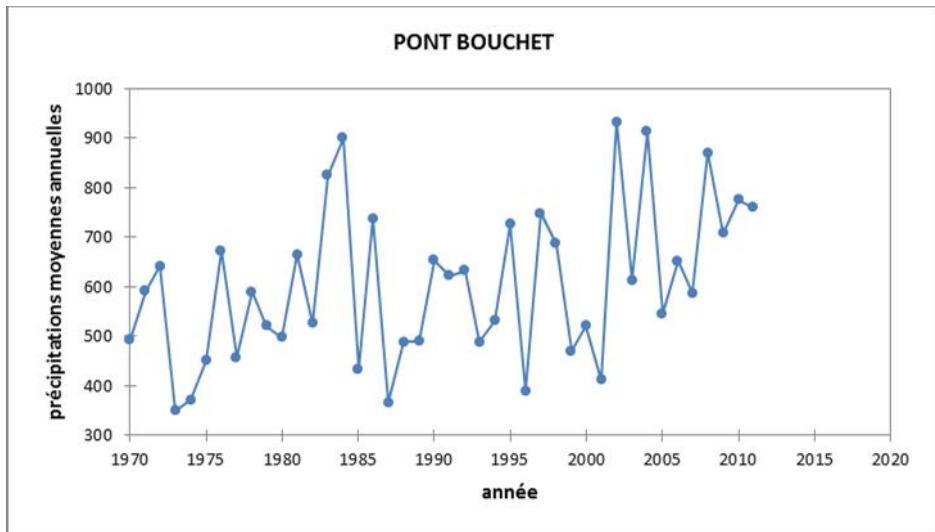


Fig.24 : Tendance à la hausse des précipitations moyennes annuelles dans 13 stations (nord l'Est algérien), période (1970-2011).

CONCLUSION :

Il apparaît à travers cette étude que les précipitations annuelles au bassin versant de l'Oued Seybouse sont caractérisées par une forte variabilité. De point de vue tendanciel, les séries annuelles ont signalé des tendances à la hausse significative sur le bassin versant, nous avons décelé des tendances à la hausse non significative. De même, l'analyse des cumuls pluviométriques annuels montre deux périodes caractéristiques propres à toutes les stations du bassin :

- Première période entre 1970 et 1995 : est une période déficitaire.
- Deuxième période relativement excédentaire détectée entre 1995 et 2011.

L'analyse des séries pluviométriques de la période d'étude 1970-2011 de la zone d'étude montre que les chroniques ne sont pas stationnaires, et qu'elles ont subi une rupture dont la date est comprise entre 1996 (Mechroha) à 2001 (El Kerma, Pont Bouchet, Ain Berda et Bordj Sabath). Sur l'ensemble des tests de détection de rupture, des ruptures sont identifiées autour de la décennie 1990 (1994, 1996) et de la décennie 2000 (2000,2001). On remarque que la majorité des ruptures se localise dans les décennies 90 et 2000. À l'échelle annuelle, en analysant les stations dont les chroniques sont les plus complètes, sur la majeure partie du bassin, une rupture climatique a été détectée après l'année 1995. Au-delà de cette date, les précipitations ont significativement haussé.

4.2 PARTIE 2 Caractérisation de la sécheresse météorologique :

La connaissance du cycle climatique à travers l'étude des précipitations et la détermination des indices indiquant la sécheresse ont l'importance primordiale des ressources en eau, de gestion agricole, et de toutes autres activités touchées par la sécheresse.

La sécheresse est l'un des phénomènes extrêmes qui ont marqué les populations à travers des générations. Dépourvue d'une définition universelle, la sécheresse peut être définie comme étant un déficit de disponibilité en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période et une région déterminée.

On distingue quatre grands types de sécheresse : météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique. Ces types de sécheresse peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'élément moteur des autres. Elle se caractérise par une réduction ou une mauvaise répartition, voire une absence des pluies dans une région donnée pendant une période de temps (Bootsma et al, 1996).

4.2 .1 Définition de la sécheresse :

La sécheresse est un phénomène qui se manifeste quand les précipitations sont considérablement en dessous des niveaux normaux enregistrés et qui provoque des déséquilibres hydrologiques graves qui nuisent aux systèmes de production des ressources en terres.

4.2.2 Types de sécheresse :

Il existe plusieurs types de sécheresse, la sécheresse météorologique, hydrologique, agricole et socio-économique.

4.2.2.1 La sécheresse agriculture :

La sécheresse agricole est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduisent significativement les productions agricoles par rapport à la normale ou les valeurs attendues pour une région de grande étendue.

4.2.2.2 La sécheresse météorologie :

La sécheresse météorologique se caractérise par une absence prolongée, un déficit marqué ou une faible distribution des précipitations par rapport à la normale climatique.

4.2.2.3 La sécheresse hydrologie :

La sécheresse survient suite à l'affaiblissement prolongé des apports pluviométriques au niveau des bassins versants. Un déficit d'écoulement en résulte systématiquement au

niveau de cours d'eau. La recharge des nappes souterraines est réduite et les opérations d'irrigation sont compromises. (A.Mokssit, 1996).

L'approche utilisée est une caractérisation de la sécheresse. Les méthodes ont été développées afin de caractériser et identifier la sécheresse climatique. Ces indices permettent de déterminer le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles de temps et de définir les classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité. Pour la période 1970-211, l'analyse faite a intégré les étapes suivantes :

- Estimation des indices de sécheresse météorologique et analyse de la dynamique climatique.
- Caractérisation spatiale des précipitations (Cartographie des indices pluviométriques).

4.2.3 Indices de sécheresse météorologique utilisés :

Ces indices utilisent généralement les mesures de précipitation recueillies aux stations météorologiques pour décrire les conditions de sécheresse. Ils ont pour but de comparer les valeurs actuelles à la tendance historique. Ils sont simples, faciles et rapides à utiliser.

4.2.3.1 Rapport à la normale des précipitations (RN) :

Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$\text{RN}(\%) = (\text{Pi}/\text{Pn}) \times 100$$

Pi est la précipitation de l'année i pour la période 1970-2011 et P_n est la précipitation normale pour la même période de temps. Une année sèche est une année dont la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque la RN est inférieure à 100 % (Rognon, 1997).

4.2.3.2 Indice de l'écart à la normale (En) :

Cet indice nommé aussi indice de déficit pluviométrique, permet de visualiser et de déterminer le nombre des années déficitaires et leur succession. Elle s'exprime par :

$$\text{En}(\%) = (\text{Pi} - \text{Pn})/\text{Pn} \times 100$$

Une année est dite sèche lorsque cet indice est négatif et humide quand il est positif. Le cumul de l'indice de l'écart en pourcentage à la normale des années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide.

4.2.3.3 Indice standardisé de précipitation(SPI) :

L'indice standardisé de précipitation « SPI » (standardise de précipitation index) a été développé en vue de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée

Chapitre 4

(McKee et al ,1993). Il prend en considération l'importance du temps dans l'analyse de la disponibilité des ressources en eau. En effet, la période de temps sur laquelle le déficit des précipitations est accumulé devient extrêmement importante pour séparer entre les différents types de sécheresses (McKee et al, 1995).

La formule mathématique de SPI est la suivante :

$$\text{SPI} = (\text{pi} - \text{pm}) / \sigma$$

Pi : Précipitation de l'année i

Pm : Précipitation moyenne

: Déviation standard ou écart type

Cet indice pluviométrique traduit un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considéré par rapport à la période de référence choisie. En premier lieu, une cartographie de la moyenne par décennie des indices pluviométriques pour chacun des postes pluviométriques considérés est dressée.

La sévérité de la sécheresse est identifiée par des valeurs SPI selon le schéma de classification (tab) proposé par (MCKEE et al, 1993), et utilisé dans plusieurs Études dans la région du Maghreb (Ali. Lebel ,2009; Ardoïn-Bardin, 2004 Ardoïn-Bardin et al, 2003 Bergaoui.Alouini ,2002).

Table.6 : Classification de la sécheresse selon SPI

classes de spi	degré de la sécheresse
SPI > 2	humidité Extrêmement
1 SPI < 2	humidité forte
0 SPI < 1	humidité modérée
-1 < SPI < 0	sécheresse modérée
-2 < SPI < -1	sécheresse forte
SPI < -2	sécheresse Extrême

La cartographie des courbes valeurs qui en résulte est une cartographie d'«intensité » de déficit ou d'excès pluviométriques. Elle révèlera ainsi le contraste entre les différentes périodes étudiées. En deuxième lieu, pour mieux visualiser les résultats obtenus, ceci dans le but d'observer :

- Une succession de périodes déficitaires et excédentaires.

- Une intervention simultanée ou non des fluctuations climatiques à une même date sur l'ensemble de la zone d'étude.

Résultats et analyse :

Caractérisation de la sécheresse météorologique :

Détermination des seuils de sécheresse :

La méthode d'intervalle de confiance appliquée à notre base de données a permis d'estimer les seuils qui indiquent la sécheresse climatique annuelle dans les treize stations (**Table.7**). Ces seuils calculés oscillent entre 1017 mm à MACHROHA et 457mm à AIN MAKHLOUF. Ils ont permis de déterminer les seuils relatifs aux indices de l'écart à la normale et du rapport à la normale dont le tableau suit (**Table.7**)

Table.7 : Seuils de sécheresse correspondants aux différents indices au cours de la période 1970-2011.

Stations	Seuil de la sécheresse (li de l'ic) (mm)	Seuil de la sécheresse de l'écart à la normale(%)	Seuil de la sécheresse du rapport à la normale(%)	Année
PONT BOUCHET	555,51	-1,832	98,17	1971
AIN BERDA	582,3	-1,138	98,86	1991
BOUCHEGOUF	502,53	-0,376	99,62	1975
BOUKHAMOUZA	625,02	-0,658	99,34	1970
EL KERMA	555,51	-2,421	97,58	1988
GUELMA (FENDJEL)	488,75	-2,085	97,91	1975
HELIOPOLIS	529,71	-0,612	99,39	1990
MECHROHA	1017,26	-0,108	99,89	2007
MEDJAZ AMAR	513,59	-0,693	99,31	2006
NECHMEYA	509,39	-0,079	99,92	1987
AIN MAKHLOUF	457,76	-1,49	98,51	1994
EL KHENGA	524,07	-1,009	98,99	1995
BORDJ SABATH	524,07	-0,293	99,71	2009

Fréquence des années sèches, normales et humides dans la période 1970-2011 :

En utilisant les seuils de sécheresse calculés ci-dessus, on a pu déterminer pour chacune des stations étudiées les fréquences des années sèches, normales et humides (**fig.25**).

(26 %-40 %) d'années humides (35 %-47%) d'années sèches et normales (14%-30%), les années sèches représentent entre 47 % 45 % et 42 respectivement à (Mechroha, El Khenga, Medjaz Amar et Mechroha) (Pont Bouchet, El Kerma et Heliopolis) et Bordj Sabath

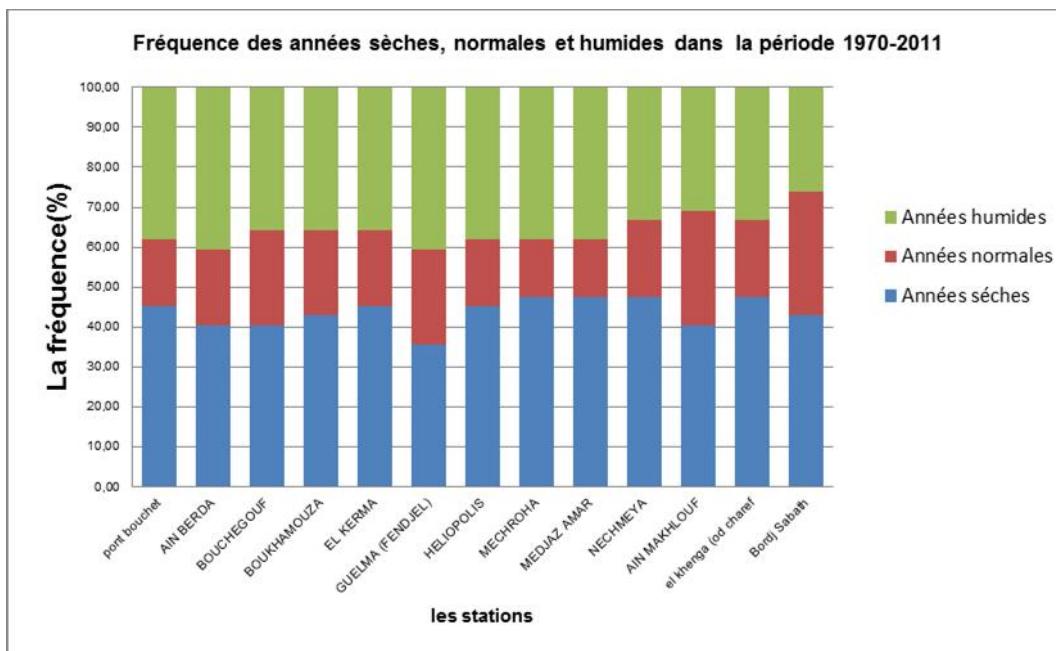


Fig.25 : Fréquence des années sèches, normales et humides de treize stations pluviométriques au cours de la période 1970-2011

Valeurs annuelles moyennes de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) sur la période 1970-2011:

Ce tableau résume les caractéristiques des différentes périodes de l'indice standardisé des précipitations (SPI) sur la période (1970 2011).

Table.8 : les caractéristiques des différentes périodes de l'indice Standardisé des Précipitations (SPI) sur la période (1970 2011).

Descripteurs	Période sèche					Période humide				1970-2011
	1970-1974	1975-1979	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2011	
moyenne	-0,43	-0,21	-0,003	-0,54	-0,07	0,12	0,46	0,06	0,85	0,03
minimum	-1,19	-0,73	-0,72	-1,06	-0,60	-0,42	-0,88	-0,73	-0,32	-1,19
maximum	0,61	0,94	0,92	0,07	0,68	1,16	1,88	2,14	2,81	2,81
écart type	0,46	0,52	0,47	0,31	0,39	0,44	0,63	0,76	0,89	0,19
écart moyen	0,32	0,42	0,37	0,25	0,30	0,32	0,41	0,54	0,64	0,09

Les valeurs moyennes de l'indice SPI sont globalement négatives sur les années 1970-1974 (-0,43) et continue respectivement 1990-1994 (-0,07), alors qu'elles sont positives sur toutes les périodes suivants : 0,85 en moyenne, avec des valeurs extrêmes de 0,46 en 2000-2004 et 0,12 en 1995-1999 (**Table.8**). La moyenne de l'indice SPI des données annuelle des 13 postes pluviométriques expliquer de période sèche années 1970-1995 et la période humide années 1995-2011.

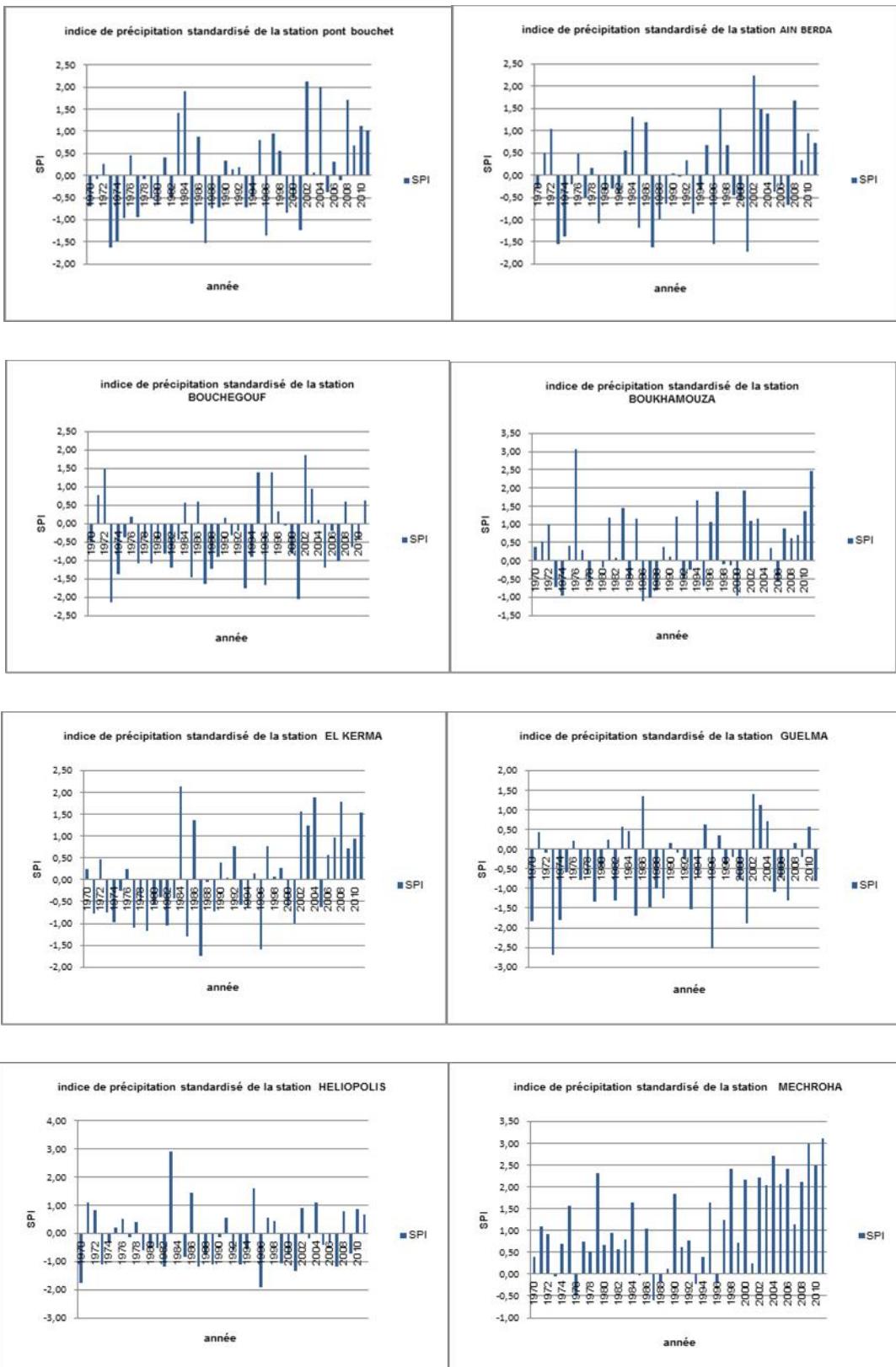
La figure présente l'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice SPI pour 13 stations pluviométriques sur la période 1970-2011, les décennies ont été marquées par une alternance de séquences humide et sèche au niveau des stations étudiées. Toutefois, les années sèches sont formées de deux, trois, voire cinq années sèches successives on trouve partout les stations.

Durant la période 1970 à 1999, de très longues séquences de sécheresse ont été enregistrées au niveau des stations analysées. Sur cette période ce déficitaire est particulièrement marqué, tandis que les valeurs positives sont un peu plus fréquentes. Sur la période sèche.

La période humide années 1995-2011 on remarque une amélioration des précipitations

La **fig.26** présente l'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice SPI pour treize stations pluviométriques sur la période 1970-2011. Ces stations sont réparties de façon à peu près homogène sur le bassin versant de l'Oued Seybouse voir (**Fig.26**). Sur les décennies 1970 et 2011,

Chapitre 4



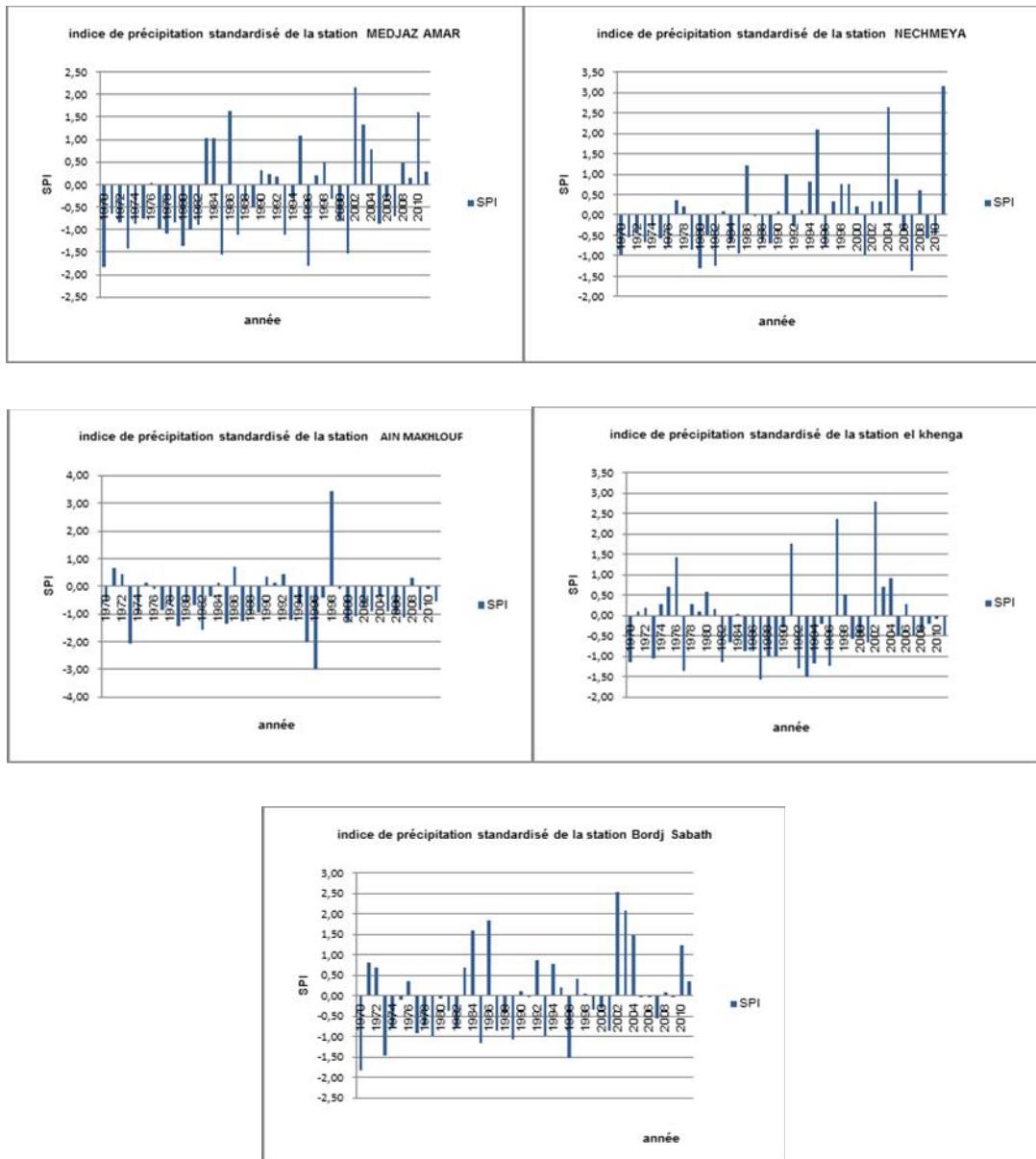


Fig.26: Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de treize stations pluviométriques sur la période 1970-2011

Cartographie de la variabilité pluviométrique annuelle :

Pour mieux visualiser on présente la variabilité spatio-temporelle des précipitations des 13 stations pluviométriques situées dans le bassin versant de Seybouse (Nord- Est Algérien) sur la période de 42 ans. La variation spatio-temporelle de la pluviométrie s'est faite en utilisant les différentes données des stations pluviométriques qui couvrent la zone d'étude. Pour réaliser cette cartographie, un grand nombre de postes pluviométriques a été retenus afin de constituer une base de données annuelle, la plus complète et la plus

Chapitre 4

représentative possible de la zone d'étude les données disponibles ont été calculées et classées pendant la période (1970 - 2011) qui couvre la disponibilité des données. La base de données obtenue est exportée sous le logiciel GIS où il a été procédé à une interpolation de type krigeage pour générer la carte thématique.

Le rapport de l'indice standardisé de précipitations (SPI). Ces indices nous ont permis de montrer que le bassin hydraulique Seybouse a connu des épisodes secs 1970-1995.

La cartographie des valeurs moyennes de l'indice sur différentes périodes entre les années sèches 19970-1995 et les années humides 1995 2011.

1970-1974 :

Durant ce quinquennat. On observe la présence d'un déficitaire avec des indices pluviométriques compris entre -1,19 et -0,24 dans la partie sud - Ouest, Sud-est et Nord-Ouest du bassin d'étude. Par contre, on observe une zone excédentaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0,1 et 0,60 dans la partie Nord-est.

En l'année **1975-1979**, les déficits continuent avec des indices pluviométriques compris entre -0,7 et -0,13 dans la partie sud - Ouest, et Nord-Ouest du bassin d'étude. Par contre, on observe une zone excédentaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0,06 et 0,93 dans la partie Nord-est et Sud-est.

1980-1984 :

On observé la présence d'un caractère excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0,1 et 0.92 dans la parties Nord-Ouest, Sud-est et Nord bassin, on observe un déficit un Sud-ouest avec l'indice entre -0,71 et -0,10.

1985-1989 :

Le caractère déficitaire s'est accentué. L'indice pluviométrique varie entre -0,98 et -0,28 sur totalité du bassin sauf la station machroha .

1990-1994 :

On observé la présence d'un caractère excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0,01 et 0.36 dans la partie Nord-Ouest, et Nord -est du bassin. On observé un déficit au Sud-ouest, Sud-est et extrême Nord -est avec un l'indice entre -0,35 et -0,08.

1995-1999 :

Une importante chute de pluie durant cette période. Elle indique une tendance excédentaire qui est particulièrement marquée au niveau de deux régions au Nord-est et Sud-est, dont l'indice pluviométrique est 0,06 et 1,16, cependant un léger déficit sur l'ouest et l'indice pluviométrique varie de - 0,46 à - 0,09.

2000-2004 :

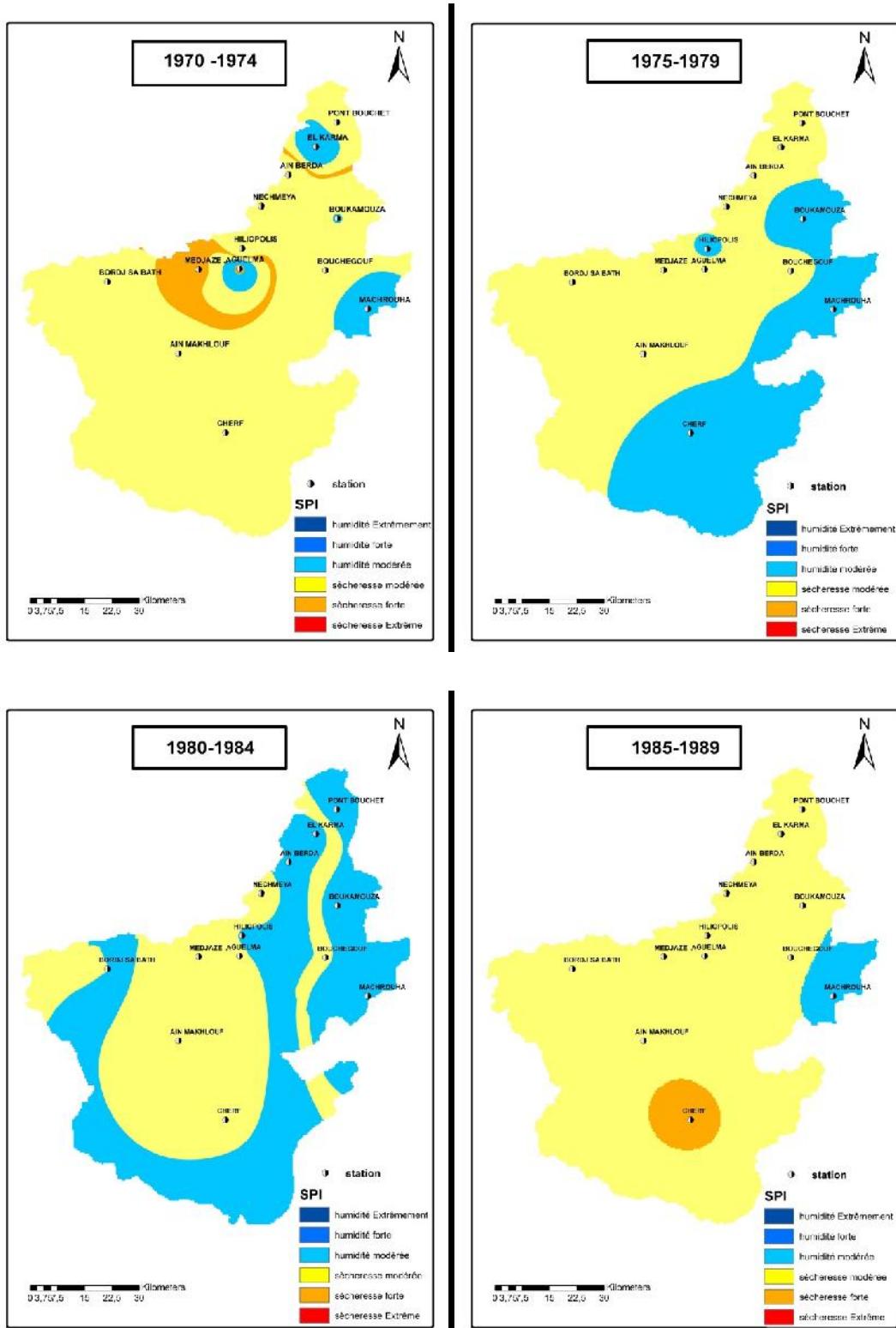
Une amélioration significative de pluie durant cette période sur presque toutes les régions, dont l'indice pluviométrique est 0,3 et 1,87, cependant un léger déficit sur la station AIN MAKHLOUF et l'indice pluviométrique de - 0,87

2005-2009 :

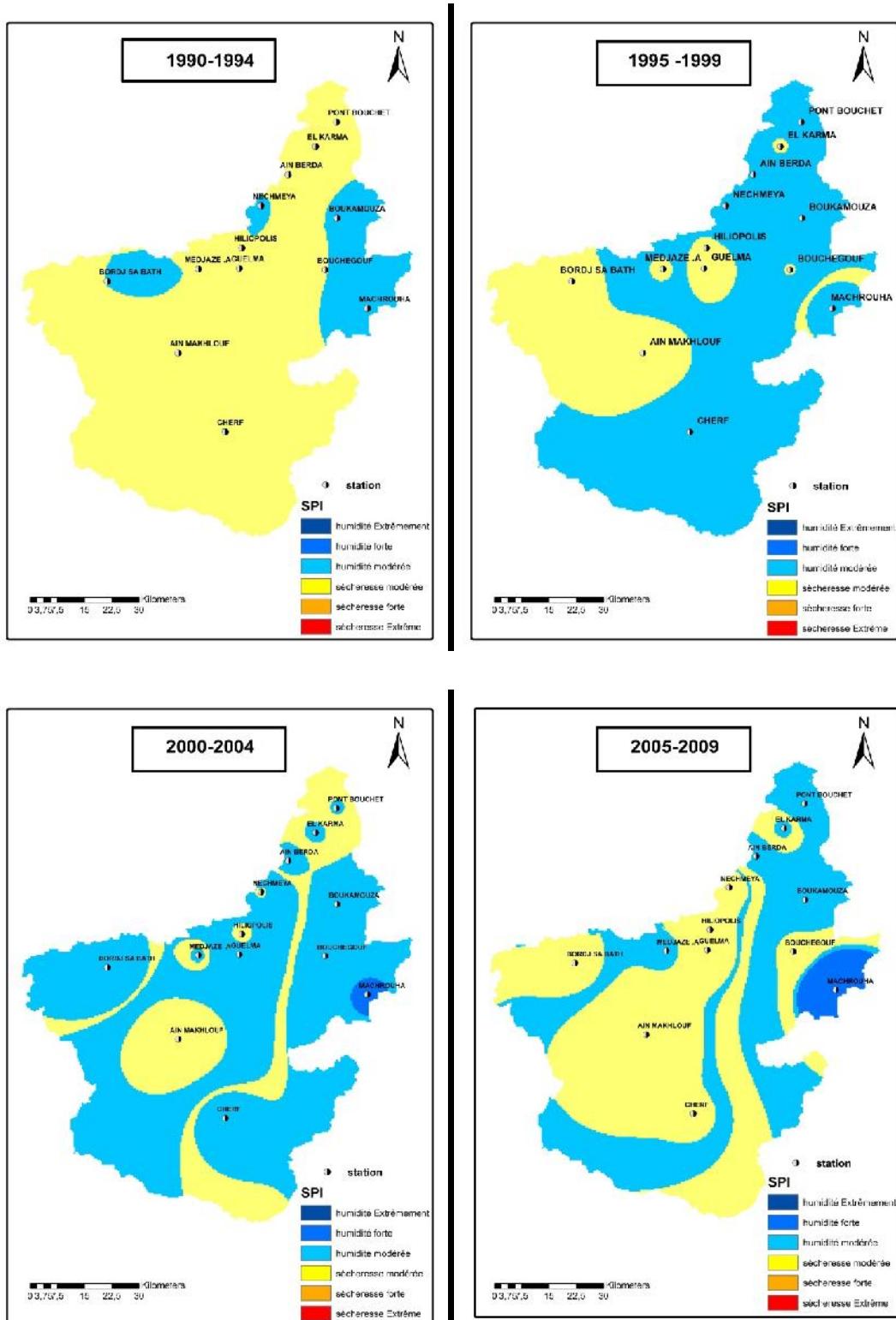
Durant ce quinquennat. On observe la présence d'un excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0,01 et 2,14 dans la partie est du bassin d'étude. , on observe une zone déficitaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0,1 et 0,60 dans la partie ouest du bassin d'étude

Et 2010-2011 :

Une amélioration significative de pluie durant cette période sur presque toutes les régions, dont l'indice pluviométrique entre 0,3 et 2,8, cependant un léger déficit sur quelques stations (Ain MAKHLOUF, CHERF, GUELMA) l'indices pluviométriques de - 0,3



Chapitre 4



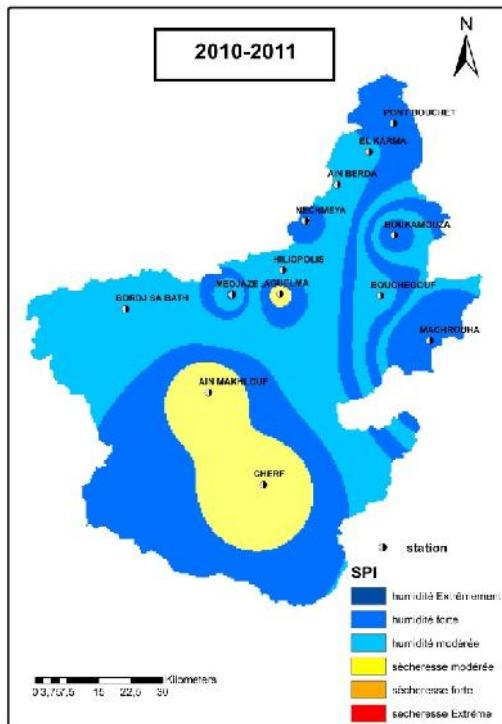


Fig.27: Répartition spatiale des valeurs moyennes de l'ISP sur différentes périodes

CONCLUSION :

Le calcul de l'indice pluviométrique standardisé nous a permis de localiser une phase déficitaire 1970, et une phase normale et excédentaire jusqu'à la décennie de 2000. Après cette date, la baisse de la pluviométrie s'est installée d'une manière significative.

À l'échelle annuelle, 47 % des sécheresses sont survenues lors des trois dernières décennies du 20ème siècle. Elles sont les plus persistantes et fréquentes, étalées sur quatre à six années consécutives, tandis que les sécheresses observées les années 70 étaient plutôt isolées sauf exception. Ainsi, les sécheresses, les plus sévères sont celles des années 1970, 1971, 1975, 1988, et 1990, elles ont touché la majorité d'Ouest du le bassin versant.

La Cartographie montre le nord-est-algérien ayant connu une succession de périodes à déficits et de périodes pluviométriques. Il apparaît d'une façon générale une tendance à la hausse couvrant les années 90 et les années 2000. La baisse de la pluviométrie était par pendant le début des années 70 et des années 80. La fluctuation la plus brutale et la plus significative (au sens statistique du terme) est observée autour des années 70, au cours

Chapitre 4

desquelles on note une diminution importante de la pluviométrie annuelle. Cette période déficitaire se caractérise depuis lors par son intensité et sa durée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le climat de notre planète a sensiblement évolué lors des dernières décennies. Un changement a été mis en évidence pour différents paramètres climatiques dans plusieurs parties du globe, plus particulièrement le régime pluviométrique. Les pluies jouent un rôle très important dans la répartition et le développement des écosystèmes naturels et humains. Elles représentent un facteur socio-économique très déterminant pour la population mondiale. Certains écosystèmes sont devenus très vulnérables à ce changement en raison de leurs capacités d'adaptation très limitées.

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'étude de la variabilité climatique multi échelle de la pluviométrique observée dans le bassin versant de l'Oued Seybouse, particulièrement sur la période 1970-2011, et d'évaluer l'impact de cette variabilité sur la répartition spatio-temporelle des sécheresses. Sa principale originalité a été de détecter les périodes de ruptures climatiques et de quantifier la réduction des volumes, mais aussi de réactualiser la carte des précipitations le bassin.

L'analyse des cumuls pluviométriques annuels montre trois périodes caractéristiques propres à toutes les stations du bassin versant .les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin. La décennie 1970-1980 apparaît un déficitaire. Les décennies 1980-1990 et 1991-2001 se distinguent par une alternance par une excédentaire déficitaire. La décennie (2001-2011) est excédentaire par apport aux décennies précédentes.

L'analyse de la caractérisation de la variabilité climatique et les tests statistiques ont détecté une rupture climatique du site d'étude montre que : Qu'elles ont subi une rupture dont la date est comprise entre 1996 (Mechroha) à 2001 (El Kerma, Pont Bouchet, Ain Berda et Bordj Sabath). Sur l'ensemble des tests de détection de rupture, des ruptures sont identifiées autour de la décennie 1990 (1994, 1996) et de la décennie 2000 (2000,2001). On remarque que la majorité des ruptures se localisent dans les décennies 1990 et 2000. À l'échelle annuelle, en analysant les stations dont les chroniques sont les plus complètes, d'autre part, sur la majeure partie du bassin, une rupture climatique a été détectée après l'année 1995. Au-delà de cette date, les précipitations ont significativement monté hausse.

Sur le territoire national, le calcul de l'indice pluviométrique standardisé annuel, 47 % des sécheresses sont survenues lors des trois dernières décennies du 20ème siècle. Elles sont les

Conclusion générale

plus persistantes et fréquentes, étalées sur quatre à six années consécutives, tandis que les sécheresses observées les années 70 étaient plutôt isolées sauf exception. Ainsi, les sécheresses, les plus sévères sont celles des années 1970, 1971, 1975, 1988, et 1990, elles ont touché la majorité d'Ouest du bassin versant.

À l'échelle régionale, les sécheresses les plus importantes ont été signalées au niveau de la région Sud-Ouest de bassin. Centre et région sud. De même, la région Montagneuse est la zone qui a enregistré la fréquence la plus élevée des années sèches avant la rupture de 1995. Cela explique la forte réduction pluviométrique constatée dans cette région. Ces résultats permettent de confirmer la tendance à l'assèchement qui s'est accentuée lors les décennies du 70.80.90 au niveau du bassin.

Pour finaliser notre travail de recherche, nous avons créé des cartes de répartition spatiale des pluies, nous avons privilégié l'utilisation combinée du modèle numérique du terrain et des données pluviométriques de certaines régions. Ainsi, la réactualisation de la carte des précipitations moyennes annuelles au bassin a été élaborée, en plus des éléments ci-dessus, en utilisant la méthode de Krigeage en covariance qui se base l'interpolation entre au moins douze stations voisines.

Finalement, nous sommes persuadés que les résultats obtenus offrent des informations sur l'intensité et la variabilité des précipitations et ses aspects spatio-temporels. Du point de vue économique, ce travail permet aux décideurs, d'une part, de localiser spatialement les régions sujettes aux accidents pluviométriques. D'autre part pour identifier et comprendre l'origine et les mécanismes de la variabilité pluviométrique qui constituent des préalables essentiels à la prévention et à la réalisation d'aménagements pour la lutte contre les aléas du climat et des tendances futures : changement climatique, de plus nos résultats pourraient être d'une grande utilité pour la première phase de la planification agricole et hydraulique, les activités agricoles sont fortement liées aux facteurs du climat.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abdelali S., Mohammed H., FOUGRACH H., et Wadi B., 2012. Etude des variations climatique de la région centre du Maroc. Actes du XXVème colloque international, de l'Association internationale de la Climatologie. AIC 2012. Grenoble. pp.709-714. ISBN-978-2-90-76-96-18-0.
- [2] Albert K., Braumann., Ulrich., TSENG., Li-Hong., et al., 1994. On-line coupling of supercritical fluid chromatography and proton high-field nuclear magnetic resonance spectroscopy. Analytical chemistry. vol. 66.No 19 p. 3042-3046.
- [3] ALI A., LEBEL T. 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. International Journal of Climatology.Vol. 29. No. 12 p. 1705–1714
- [4] ANRH. 1993. Agence nationale des ressources en eau (ANRH). Données sur les précipitations. Plan de développement 2010. Alger
- [5] Ardoine., Phillip J., et GARAND., James C., 2003. Measuring Constituency Ideology in US House Districts: A Top-Down Simulation Approach. Journal of Politics. vol. 65. No 4 p. 1165-1189.
- [6] ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydro climatiqueet impacts sur les ressourcesen eau de grands bassinshydrographiquesen zone soudano-sahélienne. Doctoral dissertation. Paris. UNESCO.
- [7] ARDOIN-BARDIN S., DEZETTER A., SERVAT E., MAHE G., PATUREL J.E., DIEULIN C., BOYER J.F. 2003. Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d'espace. Journal de l'Eau et de l'Environnement. Vol. 3 p. 5–13.
- [8] AUER., Peter., et CAZES., Sandrine I. Style and social identities: Alternative approaches to linguistic heterogeneity, p. 1-24.
- [9] BAAYEN R., Harald., DAVIDSON., Douglas J., et BATES., Douglas M. 2008. Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. Journal of memory and language. vol. 59. No 4 p. 390-412.
- [10] BATES., Bryson., Kundzewicz., Zbigniew W., WU., Shaohong., et al. 2008. climate change and Water: technical Paper vi. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- [11] BELTRANDO., Gérard., et CAMBERLIN., Pierre. 1995, Les sécheresses en Ethiopie et dans l'Est de l'Afrique. Science et changements planétaires/Sécheresse .vol. 6. No 1 p. 87-94.
- [12] BÉNINA., Touaibia., SOUHILA., Ineglig., et AREZKI., Ould Amara. 2006. Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du Centre de l'Algérie du Nord. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science. vol. 19. No 3 p. 213-219.

- [13] BERGAOUI M., ALOUINIA.W.S. 2002. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. Science et changements planétaires/Sécheresse. Vol. 12. No 4 p. 205–213.
- [14] Bergaoui Z., 1983 . Contribution à l'étude statistique de la pluie dans la région de Tunis. Thèse présentée à l'institut nationale polytechnique de Toulouse. 134 pp.
- [15] Bernstein L., Bosch P., Canziani O., Chen Z., Christ R., et Riahi K. 2008. IPCC, 2007: climate change 2007: synthesis report. IPCC.
- [16] BEYENE., Tazebe., LETTENMAIER., Dennis P., et KABAT. 2010. Pavel. Hydrologic impacts of climate change on the Nile River Basin: implications of the 2007 IPCC scenarios. Climatic change. vol. 100. No 3-4 p. 433-461.
- [17] BIGOT., Sylvain., BROU., Télésphore Yao., OSZWALD., Johan., et al. 2005. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Science et changements planétaires/Sécheresse. vol. 16. No 1 p. 5-13.
- [18] BOKO Michel., 1988. Climats et communautés rurales du Bénin: rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de doctorat. Dijon.
- [19] Bootsma A., Boisvert J.B ., De Jong R., et Baier W., 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne : Une revue des moyens d'action. Sécheresse. Volume 7, pp. 277-285.
- [20] BRICQUET J-P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., ET OLIVRY J-C. 1997. Evolution récente ressources en eau de l'Afrique Atlantique. Revue des sciences de l'eau .No3 p. 321-337.
- [21] BROU,Y. T., 1997. Analyse et dynamique de la pluviométrie dans le Sud forestier ivoirien: recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. These 3^{eme} cycle.Univ. Cocody, Coôte d'Ivoire.
- [22] Buishand T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology. vol. 58 p. 11-27.
- [23] BUISHAND., Tjerk Adriaan., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of hydrology . vol. 58. No 1-2 p. 11-27.
- [24] CANTAT., 1995. Olivier. Variabilité et variation climatiques en Normandie L'évolution récente des températures à Caen-Carpiquet. Science et changement planétaire / Sécheresse. vol. 6. No 3 p. 273-279.
- [25] CAVADIAS, Georges. 1994. Detection and modeling of the impact of climatic change on river flows. In: Engineering Risk in Natural Resources Management. Springer Netherlands. p. 207-218.
- [26] CRISCI, A., GOZZINI, B., MENEGUZZO, F., et al. 2002. Extreme rainfall in a changing climate: regional analysis and hydrological implications in Tuscany. Hydrological Processes. vol. 16. No 6 p. 1261-1274.

- [27] DAHL-JENSEN., Dorthe., MOSEGAARD., Klaus., GUNDESTRUP., Niels., & al. 1998. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science*. vol. 282. No 5387 p. 268-271.
- [28] Dessai S., Adger W N., Hulme M., Köhler JH., Turnpenny J., & Warren R., 2003. Defining and experiencing dangerous climate change p 28.
- [29] Direction de la Météorologie Nationale (DMN). 1995 .Spécial sécheresse, Bulletin d'information du Centre National du Climat et des Recherches Météorologiques. No 2.
- [30] DONAT, M. G., ALEXANDER, L. V., YANG, H., et al. 2013 Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: the HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. vol. 118.No 5 p. 2098-2118.
- [31] DOUGLAS E.M., VOGEL R.M., KROLL C.N., 2000. Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*. Vol. 240. p. 90–105.
- [32] DOUGUÉDROIT A., et 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. p. 159-163.
- [33] Drápela K., Drápelová I., 2011. Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts., the Czech Republic) 1997–2010. *Beskydy* .vol 4 No 2 p. 133–146.
- [24] DUPLESSY., Jean-Claude., 2001. État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*. vol. 333. No 12 p. 765-773.
- [25] ELBOUQDAOUI K., HAIDA S., ABOULABBES O., et al. 2006, Evolution du régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Géo-Eco-Trop*. vol. 30 p. 41-56.
- [26] FLAGEOLLET., Jean-Claude., 2012. *Atlas du réchauffement climatique 1971-2010*. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, no Volume 6.
- [27] FNIGUIRE F., LAFTOUI N.E., SAIDI M.E., ZAMRANE Z., EL HIMER H., KHALIL N. 2016. 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* p. 1–10. DOI: 10.1007/s00704-016-1873.
- [28] GAUTIER., Franck., LUBES-NIEL., Hélène., SABATIER R., et al. 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. *Hydrological sciences journal*. vol. 43. No 6 p. 921-935.
- [29] GHACHI A., 1986. *Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie: le bassin de la Seybouse*. OPU Alger.
- [30] GIEC .(groupe intergouvernemental d'évaluation des changements climatiques) .

- [31] GIEC. 2008 .Changements climatiques et impacts dans les Alpes. Résultats du WP5 du projet Clim Ch Alp. Rapport Technique N°1 de l'ONERC, France.
- [32] GIEC. Ed. Bilan .2007. des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II, 2007.
- [33] GIORGI., Filippo., HEWITSON., Bruce., CHRISTENSEN J., et al. 2007. Regional climate information evaluation and projections. 2001.
- [34] GREGORY S., 1975. On the delimitation of regional patterns of recent climatic fluctuations. Weather. vol. 30. No 9 p. 276-287.
- [35] Tabari H., Marofi S., Aeini A., Talaee PH., Mohammadi K., 2011 .Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran- Agricultural and Forest Meteorology. vol. 151p. 128-136.
- [36] HAYES M.J., WILHITE D.A., SVOBODA M.D ., Wilhite D. A., & Vanyarkho O. V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index.Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 80. No 3 p. 429–438.
- [37] HIRSCH R.M., SLACK J.R., 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence.Water Resources Research.Vol. 20. No 6 p. 727–732.
- [38] HOUNDÉNOU., Constant et HERNANDEZ., Karine. 1998. Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). Science et changements planétaires/Sécheresse, vol. 9. No 1 p. 23-34.
- [39] HRISTENSEN., Jens Hesselbjerg et CHRISTENSEN., 2007. Ole Bøssing. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic change. vol. 81 p. 7-30.
- [40] HUBERT., Pierre., CARBONNEL., Jean Pierre., et CHAOUCHE., Ali. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. Journal of hydrology. vol 110. No 3-4 p. 349-367.
- [41] HULME., Mike., DOHERTY., Ruth., NGARA., Todd., et al. 2001. African climate change: 1900-2100. Climate research, vol. 17. No 2 p. 145-168.
- [42] Jones P D., 2008. Hemispheric surface air temperature variations: Recent trends and an up-date to 1987. J Clim. Vol 1 p. 654-660.
- [43] JONES, P. D. 1988. Hemispheric surface air temperature variations: Recent trends and an update to 1987. Journal of Climate, vol 1. no 6 p. 654-660.
- [45] Kadi D., 1995. Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [46] KENDALL M.G. 1975. Rank correlation methods. 4th ed. London.Charles Griffin pp. 202
- [47] Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., 2002 . Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie » Laboratoire de

- recherche en Sciences de l'eau – LRS – EAU/ENP Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) – Alger; Colloque international sur l'eau. Chelef. 05/06/février. Algérie.
- [48] 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. These de doctorat, université d'Oran.Algérie.
- [49] Kingumbi A., 2006 . Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat. Université de Tunis El Manar. 300 p.
- [50] L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. Journal des sciences Hydrologiques. vol 47. No 4. p.563-572.
- [51] Lahache RG., et Pillet G., 2008. Projection des ressources en eau de la Tunisie sous les effets des changements climatiques globaux. XIIIth World Water Congress (Montpellier, 2008).12 p.
- [52] Lee A.F.S. & Heghinian S.A., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables – a Bayesian approach. Techno metrics. vol 19. No 4. p. 503-506.
- [53] LI., Jun., LI., Xi., ZHAI., Hua-Jin., et al. Au20. 2003 a tetrahedral cluster. Science. vol. 299. No 5608. p. 864-867.
- [54] LIU., Jing., CHEN., Shangshang., QIAN., Deping., et al. 2016. Fast charge separation in a non -fullerene organic solar cell with a small driving force. Nature Energy. vol. 1.p. 16089.
- [55] LOGEAT., Frédérique., BESSIA., Christine., BROU., Christel., et al. 1998. The Notch1 receptor is cleaved constitutively by a furin-like convertase. Proceedings of the National Academy of Sciences. vol. 95.No 14.p. 8108-8112.
- [56] Lubès H., Masson JM., Servat E., Paturel JE., Kouame B. ,& Boyer JF. 1994. Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique. Rapport N° 3 Programme ICCARE. ORSTOM. Montpellier.
- [57] LUBES H., MASSON J. M., RAOUS P., et al. , 1994. SAFARHY, Logiciel de Calculs Statistiques et d'Analyse Fréquentielle Adapté al'Évaluation du Risque en Hydrologie. Manuel de Référence. ORSTOM, Université Montpellier II.
- [58] LUBES-NIEL., Hélène., MASSON J. M., PATUREL., Jean-Emmanuel., et al. 1998, Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science. vol. 11.No 3 p. 383-408.
- [59] MAHERAS P., 1981. La variabilite des precipitations dans la mer Egee. Archives for meteorology. Geophysics . and bioclimatology. Series B. vol. 29. No 1-2. p. 157-166.
- [60] MANN., Henry B., 1945. nonparametric tests against trend. Econometrica . Journal of the Econometric Society. p. 245-259.

- [61] MATARI A., KERROUCHE M., BOUSID H., DOUGUEDROIT A., 1999. Sécheresse dans l'ouest algérien. Publications de l'association internationale de climatologie. volume 12.
- [62] MATTOO., Seema., et CHERRY., James D., 2005. Molecular pathogenesis, epidemiology, and clinical manifestations of respiratory infections due to *Bordetella pertussis* and other *Bordetella* subspecies. Clinical microbiology reviews. vol. 18. No 2 p. 326-382.
- [63] Mavromatis T., Stathis D., 2011. Response of the water balance in Greece to temperature and precipitation trends, Theoretical and Applied Climatology . Vol 104. Issue 1-2. pp. 13-24.
- [64] MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., 1993.The relationship of drought frequency and duration times scales. American Meteorological Society. 8th conference on Applied Climatology, 17-22 Janvier,Anaheim, CA. pp.179- 184.
- [65] MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1995 .Drought monitoring with multiple times scales. American Meteorological Society.9th conference on Applied Climatology, 15-22 Janvier, Dallas. TX.pp. 233-236.
- [66] MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1993.The relationship of drought frequency and duration to time scales.In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, AMS, Anaheim. CA p. 179–184.
- [67]Mebarki A., 2010 . Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. Science et changements planétaires / Sécheresse. Vol 21. I 4. P. 3-10.
- [68] MEBARKI A., 1982. Le Bassin du Kébir-Rhumel: Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau. Thèse de doctorat. Thesis. Univ. Nancy II, France.
- [69]MEBARKI A., 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri de Constantine.
- [70]Meddi H. et Meddi M, 2009, Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse. Vol .20 pp. 57-67.
- [71] MEDDI., Mohamed., et HUMBERT., Joel., 2000. Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. Publication de l'Association internationale de climatologie. vol. 13. p. 266-274.
- [72] MEDJERAB A., HENIA L., 2005. Régionalisation des pluiesannuellesdansl'Algérie Nord-occidentale .Revue Géographique de l'Est. Vol. 45. No 2.
- [73] MEDJERAB., Abderahmane., et HENIA., Latifa., 2005. Etude pluviométrique de l'Algérie nord occidentale (approche statistique et cartographie automatique). Thèse de doctorat.
- [74] MITCHELL., Timothy D., et JONES., Philip D., 2005. An improved method of constructing a data base of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International journal of climatology. vol. 25. No 6 p. 693-712.

- [75] MOKSSIT A., 1996. La sécheresse dans le climat marocain. Atelier sur la prévention et la gestion des situations de sécheresse dans les pays du Maghreb, juin 1996. pages 107-124.
- [76] MOONEN A. C., ERCOLI L., MARIOTTI M., et al. 2002 .Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. Agricultural and Forest Meteorology. vol. 111. No 1 p. 13-27.
- [77] MOREIRA E.E., PIRES C.L., PEREIRA L.S. 2016. SPI drought class predictions driven by the North Atlantic Oscillation Index Using Log-Linear Modeling. Water. Vol. 8.Iss.2, 43. DOI: 10.3390/w8020043.
- [78] MORON., 1994. Vincent. Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933–1990). International Journal of Climatology. vol. 14. No 3 p. 325-341.
- [79] Nicholls N., Gruza G V., Jouzel J., Karl TR., Ogallo LA., Parker DE., 1996. Observed climate variability and change, Cambridge University Press, Cambridge pp. 137-192.
- [80] Nicholls R. J., Hanson S., Herweijer C., Patmore N., Hallegatte S., Corfee-Morlot J., ... & Muir-Wood R., 2008. Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes.
- [81] NICHOLSON S. E., and WIGLEY T. M. L., 1984. Drought in Morocco, the General Climatology of Drought. Report to the Conseil Supérieur de l'Eau.
- [82] NICHOLSON, S. E., WIGLEY, T. M. L., et LA SÉCHERESSE AU MAROC, I. I. Analyse statistique des données pluviométriques. Rapport au conseil supérieur de l'eau, 1984. Chaumont M., & Paquin C., 1971 : Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000.
- [83] NOUACEURZ., LAIGNEL B., et TURKI., Imen., 2013. Changements climatiques au Maghreb: vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien?. Physio-Géo. Géographie physique et environnement. Volume 7 p. 307-323.
- [84] OBA G., LUSIGI W.J., 1987. An overview of drought strategies and land use in African pastoral systems. Overseas, Development Institute Agricultural Administration Unit. Paper 23a pp. 29.
- [85] OETTLÉ, N., ARENDSE, A., KOELLE, B., et al. 2004, Community exchange and training in the Suid Bokkeveld: a UNCCD pilot project to enhance livelihoods and natural resource management. Environmental monitoring and assessment. vol. 99. No 1 p. 115-125.
- [86] OMM .2013. 2001-2010, une décennie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de presse No 976, URL : http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_976_fr.html.
- [87] OMM. .2007. Guide to climatological practices, Third edition, WMO N° 100, Geneva, 113 p.
- [88] Önöz B., 2012. Bayazit M., Block bootstrap for Mann-Kendall trend test of serially dependent data, Hydrological Process, Wiley, DOI:10.1002 , 2012.

- [89] OTCHOUMOU., Atcho., N'DA., Konan., DOSSO., Henri., et al. 2003. Inventaire de végétaux sauvages consommés par l'escargot géant africain *Archachatina ventricosa* (Gould, 1850): préférences alimentaires. *Haliotis*. vol. 33 p. 15-22.
- [90] OUÉDRAOGO Mahaman., 2001. Contribution à l'étude de l'impact et de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale.
- [91]Pachauri R. K., & Reisinger A., (Eds.). 2008. Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. GIEC.
- [92]PALMER W.C., 1965. Meteorological drought. *Weather Bureau Research , Paper*. No. 45 pp.58.
- [93]PARKER, D. E., HORTON, E. B., et ALEXANDER, L. V. 2000, Global and regional climate in 1999. *Weather*, vol. 55, no 6, p. 188-199.
- [93] Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A., 2004 . Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. Sud Sciences and Technologies. No13. pp 40 – 46.
- [94] PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTR, M. O., et al., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological sciences journal*, vol. 43. no 6 p. 937-946.
- [95]PATUREL J. E., SERVAT E., KOUAMÉ B., et al., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II: an integrated regional approach. *Journal of hydrology*. vol 191. No 1-4 p. 16-36.
- [96] PATUREL., Jean-Emmanuel., SERVAT., Éric., KOUAME, Brou., et al., 1995. Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de à Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. vol. 6. No 1 p. 95-102.
- [97]PEARSON., Richard G., et DAWSON., 2003. Terence P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global ecology and biogeography*. vol 12. No 5 p. 361-371.
- [98] Pettitt AN., (1979. A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Statistics*. Volume 28. No2 pp. 126-135.
- [99] PIERVITALI E., and COLACINO M., 2003. Precipitation scenarios in the central-western Mediterranean Basin. In : *Mediterranean Climate*. Springer Berlin Heidelberg. p. 245-258.
- [100] PLAUT., Itai. Critical swimming speed: 2001. its ecological relevance. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. vol 131. No 1 p. 41-50.

- [101]Renard B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre, O., Niel, H,& Sauquet, E. 2006,Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. La houille blanche. No 6 p. 48-54.
- [102]ROGELJ., Joeri., MEINSHAUSEN., Malte., et KNUTTI Reto., 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Nature climate change. vol. 2. No 4 p. 248-253.
- [103]ROGNON P., 1997. Sécheresse et Aridité : Leur impact sur la désertification au Maghreb. Sécheresse . No 7 p. 287-297.
- [104]ROOT., Terry L., PRICE., Jeff T., HALL., Kimberly R., et al. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature. vol. 421. No 6918 p. 57-60.
- [105]SALARIJAZI M., AKHOND-ALI A.M., ADIB A., DANESHKHAH A. 2012. Trend and change-point detection for the annual stream-flow series of the Karun River at the Ahvaz hydrometric station.African Journal of Agricultural Research.Vol. 7. No. 32 p. 4540–4552.
- [106] SALINGER M. J., New Zealand climate: II. 1980. Temperature patterns. Monthly Weather Review. vol. 108. no 11 p. 1905-1912.
- [107] Saloui A. 1996. Précipitations et bilans hydriques dans des plaines atlantiques Marocaines. Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences humaines de Mohammedia, Série Colloque n° 8.
- [108]SANCHEZGOMEZ E., and TERRAY L., 2005, large-scale atmospheric dynamics and local intense precipitation episodes. Geophysical research letters. vol. 32. no 24.
- [109] SAVANÉ I., et SORO N., 2001. Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire: recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienne. Africa Géoscience Review. vol. 8. no 3/4 p. 379-390.
- [110] Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H., et Badri W., 2012. Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. In : Les climats régionaux : observation et modélisation, Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie
- Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel. 219 p.
- [111] SEN P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association. Vol. 63. No. 324 p. 1379–1389.
- [112]Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M., & Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Abidjan'98 Conference), Publication IAHS. No 252 p. 323-337
- [113]Servat E., Paturel J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M., et Masson J.M., 1997 .Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. Journal of Hydrology. 191. pp 1-15.

- [114] SERVAT E., PATUREL J. E., LUBÈS-NIEL H., et al. 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science. vol. 12. no 2 p. 363-387.
- [115] SERVAT., Eric., PATUREL., Jean-Emmanuel., KOUAME., Brou., et al. 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. IAHS PUBLICATIO. p. 323-338.
- [116] SIRCOULON J., 1976. Les données hydro-pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale: Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie. Vol. 13. No. 2 p. 75–174.
- [117] SMITHSON, Peter A., IPCC, 2001. climate change 2001. the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by JT Houghton. Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ van der Linden, X. Dai, K. Maskell and CA Johnson (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2001. No. of pages: 881. International Journal of Climatology, 2002, vol. 22, no 9, p. 1144-1144.
- [118] Sneyers R., 1990. On the statistical analysis of observation. Technical Note N. 143, WMO
- [119] Stour L & Agoumi A., 2009. Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies, Hydroécologie appliquée. Vol.16 pp. 215-232.
- [119] TABET-AOUL., Amel., SAIDANI., Fatma., ROCHEFORT., Dominic., et al. 2011, Pulsed Laser Synthesis of SnO₂-Pt Nano-Thin Films onto Carbon Nanotubes and their Electrocatalytic Activity Towards Ethanol Oxidation. Int. J. Electrochem. Sci. vol. 6 p. 6385-6397.
- [120] TARHULE., Aondover et WOO., Ming-Ko., 1998. Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. International Journal of Climatology. vol. 18. no 11 p. 1261-1271.
- [121] TAXAK A.K., MURUMKAR A.R., ARYA D.S., 2014. Long term spatial and temporal rainfall trends and homogeneity analysis in Wainganga basin, Central India. Weather and Climate Extremes. Vol. 4 p. 50–61
The Nation, 25 Mai 2000 : <http://www.africanews.org/east/kenya/stories>
- [122] TOLBA., Mostafa K., et SAAB., Najib W., 2009. Arab environment: Climate change. In : Beirut, Arab Forum for Environment and Development.
- [123] TRIGO, Ricardo M., POZO-VÁZQUEZ, David, OSBORN, Timothy J., et al. 2004. North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. International Journal of Climatology. vol. 24. No 8 p. 925-944.
- [124] Van Rooy M.P., 1965. A rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. Notos. Vol. 14p. 43–48.

- [125] Vinnikov K.Y., Groisman P.Y., Lugina K.M. 1990. Empirical data on contemporary global climate changes (temperature and precipitation). *Journal of Climate*. Vol. 3. No. 6 p. 662–677.
- [126] WANG., Chunzai., 2007. Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*. vol. 29. No 4 p. 411-422.
- [127] Watson R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H., 1997: The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1977. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- [128] WMO., 1966. Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology - Technical Note N° 79. Secretariat of World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland, 79 p.
- [129] WRIGHT., Christopher., ANGUS., Brian., NICHOLSON., Stewart., et al., 1989. Expression of c-erbB-2 oncogene: a prognostic indicator in human breast cancer. *Cancer research*. vol. 49. No 8 p. 2087-2090.
- [130] YUE S., PILON P. 2004. A comparison of the power of the test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 49. Iss.1 p. 21–37.

Annexe

Article 1: Surveillance de la sécheresse dans le bassin de Seybouse (Algérie) au cours des dernières décennies

**Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria)
over the last decades**

**Amina KHEZAZNA¹⁾, Hocine AMARCHI¹⁾, Oussama DERDOUS²⁾,
Fouad BOUSAKHRIA¹⁾**

1-Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département d'Hydraulique Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

Université Kasdi Merbah, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Civil et Hydraulique, Route Ghardaïa, BP 511, Ouargla, 30000, Algérie.

*Article soumis au Revue journal of water and land development
2017, No. 33
(Soumis le : 28.10.2016 Révisé le : 01.12.2016 Accepté le : 14.12.2016).*

Received 28.10.2016
Reviewed 01.12.2016
Accepted 14.12.2016

A – study design
B – data collection
C – statistical analysis
D – data interpretation
E – manuscript preparation
F – literature search

Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades

Amina KHEZAZNA¹⁾ ABCEF✉, Hocine AMARCHI¹⁾ ABCF,
Oussama DERDOUS²⁾ CDEF, Fouad BOUSAKHRIA¹⁾ ABC

¹⁾ Badji Mokhtar University, Faculty of Engineering Sciences, Department of Hydraulics, BP 12, 23000 Annaba, Algeria;
e-mail: a.khezazna@gmail.com, amarchihocine@yahoo.fr, fouad.bousakhria@univ-annaba.org

²⁾ Kasdi Merbah University, Faculty of Applied Sciences, Department of Civil Engineering and Hydraulic, Route Ghardaïa,
BP 511, Ouargla, 30000, Algeria; e-mail: oussamaderdous@hotmail.fr

For citation: 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. No. 33 p. 79–88. DOI: 10.1515/jwld-2017-0022.

Abstract

Algeria is amongst the African countries most affected by climate change impacts especially by drought which caused considerable economic losses in the past decades. In this paper, drought monitoring for the period between 1970 and 2011 was conducted in the Seybouse watershed by analysing annual rainfall data in terms of variability and trends along with the calculation of the standardized precipitation index (*SPI*). The results indicated important inter-annual rainfall fluctuation and a significant increasing trend. The estimated drought indices indicated that the Seybouse watershed experienced in the past a long dry period with a moderate severity followed by a long wet period at the majority of the study area. Moreover, the interpolation of the standardized precipitation indices (*SPI*) on the entire Seybouse basin in GIS allowed visualizing and evaluating the spatial-temporal evolution of drought in the region which should help the decision-makers in the management of water resources, agriculture and other activities that may be affected by drought.

Key words: *climate change, drought, GIS, Seybouse watershed, standardized precipitation index (SPI)*

INTRODUCTION

Drought is one of the most important natural hazards that presented a serious problem for human societies and ecosystems across generations. According to WILHITE and GLANTZ [1985] drought is classified into four categories: (i) Meteorological drought; defined as a lack of precipitation for a period of time over the affected area; (ii) Hydrological drought defined as an insufficiency in surface and subsurface water resources supply; (iii) Agricultural drought refers to a period with soil moisture deficit, which affects the crop productivity; (iv) Socioeconomic drought is associated with insufficient water resources

supply to satisfy the economic needs in the affected region.

To face this hazard, men tried to appreciate the phenomenon by trying to understand the climate cycles through the study of the variability and the trends of different climatic variables especially rainfall and temperatures [BALLING *et al.* 1998; HE, GAUTAM 2016; NICHOLSON 1989; VINNIKOV *et al.* 1990; ZHAI, PAN 2003].

Since 1900, several indices were developed to identify and to assess the severity of drought, such as the rainfall anomaly index (*RAI*) [VAN ROOY 1965], the Palmer drought severity index (*PDSI*) [PALMER 1965], and the standardized precipitation index (*SPI*) [MCKEE *et al.* 1993; 1995] this latter is recommended

by many organizations such as the World Meteorological Organization (WMO) and the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) for characterizing meteorological droughts as well as the other categories of droughts [MOREIRA *et al.* 2016] due to its simplicity, its robustness, and flexibility for drought analysis as it can be used at different time scales (e.g., weekly, monthly, yearly) [HAYES *et al.* 1999].

The last century in African was marked by drought phenomenon which affected many countries and caused colossal economic loss [OBA, LUSIGI 1987; SIRCOULON 1976] Algeria was not an exception, according to the studies of MEDJERAB, HENIA *et al.* [2005] the North West of Algeria experienced in the two last decades a severe drought characterized by rainfall deficits varying from 12% to 20%.

The studies of KETTAB *et al.* [2004] conducted for the period between 1980 and 1990 noted a rainfall deficit of about 50% in the central regions of Algeria, while it come up to 30% in the western and the eastern parts.

At a larger regional scale, LABORDE [1993] studied rainfall data of 120 stations Northern Algeria, the results indicated an alternation of wet and dry sequences; (i) a long wet sequence from 1922 to 1938 characterized by rainfall excess of about 6%. (ii) A dry sequence from 1939 to 1946 in the eastern and the centre parts of Algeria with a rainfall deficit of about 11%. (iii) A wet sequence from 1947 to 1972 (iii) and a long dry sequence that starts from 1973.

This paper aims at assessing the spatial and temporal evolution of drought over the Seybouse watershed (North-eastern Algeria) for the period between 1970 and 2011 by analysing precipitation series using a number of tests (Mann-Kendall, Sen's slope estimator, Pettitt) and by calculating and mapping the standardized precipitation index (*SPI*).

STUDY AREA AND DATA

STUDY AREA

The Seybouse watershed which covers an area of 6471 km² is located in the North East of Algeria between the latitudes 36°15' and 37°00' North and the longitudes 7°15' and 7°55' East, it is part of the Hydrographic Region Constantine – Seybouse – Mellegue, bordered North by the Mediterranean Sea and south by the high plateaus of Constantine (Fig. 1). The study area is characterized by a Mediterranean climate with hot and dry summer, and cold and rainy winter. The mean annual rainfall ranges from 1167.96 mm at Mechrouha to 507.97 mm at Ain Makhlouf (Tab. 2), which indicates a heterogeneous spatial distribution of rainfall over the study area. The Seybouse watershed has three main watercourses which are the Bouhamdane, the Charef and the Seybouse rivers. The Seybouse River begins in Medjaz Amar at the confluence of the two other rivers and runs for about 225 km

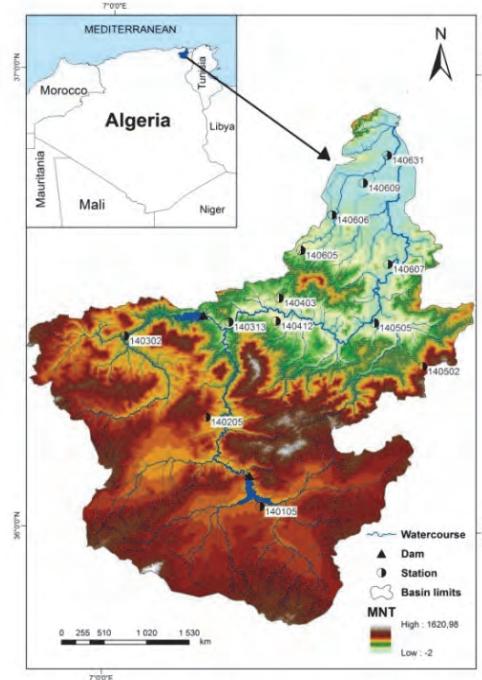


Fig. 1. Map of the Seybouse watershed and hydrometric station; source: own elaboration

North ending in the South-East of Annaba city into the Mediterranean Sea with an average annual flow of 11.5 m³·s⁻¹.

RAINFALL DATA

The study of climate requires long and many series of observations. The quality of data represents a major element in these studies [MEDDI, HUBERT 2003]. In this study, 13 rainfall stations (Tab. 1) managed by the National Agency of Water Resources (ANRH) was used to create as possible the most complete and representative annual data-base of the zone of study (Fig. 1). The data collected from these stations follow the criteria of quality and quantity. The series of observations taken into account spread over 42 years between 1970 and 2011.

Table 1. Characteristics of rainfall stations in the Seybouse watershed

Stations	x	y	Code
Pont Bouchet	387676.538	4075860.31	140631
Ain Barda	374436.463	4061429.10	140606
Nechmeya	366951.782	4052869.16	140605
Boukamouza	387853.440	4049493.79	140607
Bouchegouf	384626.796	4035289.75	140505
Guelma (Fendjel)	360987.538	4035719.82	140412
Heliopolis	361718.010	4041294.87	140403
Mechrouha	396191.581	4024729.98	140502
El Karma	381949.053	4069154.17	140609
Medjaz Amar	349708.384	4035499.41	140313
Ain Makhlouf	344190.352	4012483.12	140205
Charef (El Khenga)	357146.418	3990797.14	140105
Ain Sabath	324651.829	4032145.71	140302

Source: National Agency of Water Resources [ANRH 2009].

The principal statistical characteristics of the rainfall series are presented in the Table 2.

The statistical analysis conducted on the annual rainfall series shows that their distribution is Asymmetric. We noted also a significant difference between the position's parameters (average, median). The co-

efficient of variation for annual rainfall is characterized by high fluctuations especially at the stations Mechrouha and Nechmeya where the coefficient of variation is at 43% and 40% respectively, while it ranges from 24% and 33% at the other stations.

Table 2. Statistical characteristics of the rainfall data

Station	Mean rainfall	Median	Minimum	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation	Coefficient of skewness	Sen's slope	<i>p</i> value of MK
	mm								
Pont Bouchet	602.64	590.40	349.64	933.60	155.84	0.26	0.37	5.170	0.010
Ain Berda	630.88	595.80	368.20	973.00	153.14	0.24	0.22	3.425	0.114
Bouchegouf	547.96	537.65	279.30	884.00	150.22	0.27	0.42	1.926	0.343
Boukamouza	685.07	675.40	380.50	1212.91	198.55	0.29	0.49	4.019	0.187
El Kerma	608.43	601.54	296.30	976.08	174.97	0.29	0.21	6.921	0.004
Guelma	531.68	530.00	222.60	802.00	141.95	0.27	0.00	2.219	0.262
Heliopolis	581.26	547.05	279.10	1100.20	170.42	0.29	0.85	0.219	0.863
Mechrouha	1167.96	1066.40	298.60	2158.24	498.30	0.43	0.10	24.844	0.001
Medjaz Amar	561.68	534.00	309.10	946.40	1593.01	0.28	0.40	5.503	0.005
Nechmeya	593.66	527.17	264.95	1353.46	239.79	0.40	1.10	6.654	0.013
Ain Makhlof	507.97	490.60	107.19	1176.10	166.03	0.33	1.56	-0.461	0.763
Charef	574.24	546.03	343.90	1065.60	165.87	0.29	1.14	1.145	0.682
Bordj Sabath	542.19	538.75	264.30	928.50	151.70	0.28	0.76	3.740	0.048

Source: own study.

METHODS

ANALYSES OF THE HOMOGENEITY OF THE RAINFALL DATA

Homogeneity of rainfall data was performed to define the trends and the change points in the annual rainfall time series using: (i) the Mann–Kendall test, (ii) Sen's slope, and (iii) the Pettitt test.

MANN–KENDALL TEST

The non-parametric Mann–Kendall (MK) test proposed by MANN [1945] and extended by KENDALL *et al.* [1975] is used in this study to detect trends in rainfall data. This technique recognizes any trend in a given time series, without specifying whether the trend is linear or not [HISDAL *et al.* 2001]. The MK test was widely used to test the trend of meteorological and hydrological data as it accepts missing values in the time series [PATRA *et al.* 2012; PINGALE *et al.* 2015; 2016; WU *et al.* 2008].

Test statistic S defined as [TAXAK *et al.* 2014]:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

where: x_j = the sequential data values; n = length of the data set

$$\text{sgn}(y) = \begin{cases} 1 & \text{if } y > 0 \\ 0 & \text{if } y = 0 \\ -1 & \text{if } y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

It has been documented that when $n \geq 8$, the statistic S is approximately normally distributed with the mean $E(S) = 0$ and variance as

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

where: m = the number of tied groups; t_i = the size of the i^{th} tied group.

Monte Carlo simulation was used to assess the statistical significance of the trends at a significance level of 5%. At this level, a positive trend is significant when $p\text{-value} > 0.05$, and a negative trend is significant when its $p\text{-value} < 0.05$ [FINIGURE *et al.* 2016; YUE, PILON 2004]. The null hypothesis H_0 assumes that there is no trend in the series, which means that they are homogeneous [DOUGLAS *et al.* 2000].

SEN'S SLOPE ESTIMATOR

The trend magnitude is estimated using a non-parametric median based slope estimator proposed by SEN [1968] and HIRSCH *et al.* [1984]. The Sen's slope is given by the following expression [SALARIJAZI *et al.* 2012]:

$$\beta = \text{median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \text{ for all } k < j \quad (4)$$

where: $1 < k < j < n$, and β is considered as median of all possible combinations of pairs for the whole data set.

CHANGE POINT TEST

The change point test proposed by PETTITT [1979] derived from the Mann–Whitney statistical test is adopted in this study to identify the presence and timing of non-stationarity in the form of an abrupt

shift in the mean annual rainfall series. It is a non-parametric test that requires no assumption about the distribution of data. This test has been widely used to detect change points in the observed meteorological and hydrological time series [TAXAK *et al.* 2014].

The change point t is detected by determining if the mean time series can be divided in two statistically different series before and after t . The null hypothesis H_0 states that no shift exists in the time series at time t which means that both means of the subsamples are consistent. The alternative hypothesis H_a is that change-point exists at time t , in which $t = 1, \dots, n$ as all possible subdivisions of the time series are measured, since t is unknown here [ISHAK 2014].

In the present study, the significance of the test is assessed using the Monte Carlo resampling procedure which computes the corresponding p -values at the level of significance of 5%. At this level, a change-point exists when p -value < 0.05 .

ANALYSIS OF THE RAINFALL DATA BY PLUVIOMETRIC INDICES

The standardized precipitation index (*SPI*) method proposed by MCKEE *et al.* [1993; 1995] was employed in this study to analyse the rainfall data by identifying dry and wet sequences and assessing the severity of drought. As over-mentioned the *SPI* method is a highly recommended technique, as well it was employed in several researches all around the world [AWANGE *et al.* 2016; BONACCORSO *et al.* 2003; HAYES *et al.* 1999; ZHOU, LIU 2016].

The calculation of *SPI* requires at least 30 years of rainfall data which allow evaluating the probability distribution function, this latter is normalized to have the mean of zero. The values of *SPI* are expressed in standard deviations where positive *SPI* indicating greater than median rainfall designate wet condition, while negative values indicating less than median rainfall designate wet condition [EDWARDS *et al.* 1997].

Mathematically the *SPI* is calculated using the following expression:

$$SPI = \frac{1(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (5)$$

where: P_i = the actual rainfall (mm), P_m = the mean rainfall, σ = the standard deviation.

Drought severity is identified through *SPI* values according to the classification scheme (Tab. 3) pro-

Table 3. Classification of drought severity based on *SPI*

Drought category	<i>SPI</i> classification
Extremely wet	$SPI \geq 2$
Very wet	$1 \leq SPI < 2$
Moderately wet	$0 \leq SPI < 1$
Moderately dry	$-1 < SPI < 0$
Severely dry	$-2 < SPI \leq -1$
Extremely dry	$SPI \leq -2$

Source: MCKEE *et al.* [1993], modified.

posed by MCKEE *et al.* [1993], and used in several studies in the Maghreb region [ALI, LEBEL 2009; ARDOIN-BARDIN 2004; ARDOIN-BARDIN *et al.* 2003; BERGAOUI, ALOUINI 2002].

RESULTS AND DISCUSSION

HOMOGENEITY ANALYSIS

The results of the Mann–Kendall test (Tab. 2) indicated that the null hypothesis H_0 is accepted for Ain Berda, Bouchegouf, Boukamouza, Guelma, Heliopolis, Ain Makhlof, and Charef stations (p -value > 0.05), with magnitudes of trends equal, respectively, to 0.1141, 0.3426, 0.1875, 0.2617, 0.8633, 0.7631, 0.6824. The mentioned stations present certain homogeneity of annual rainfall data at 5% level of significance. On the other hand, the probability of the null hypothesis is rejected for Pont Bouchet, El Kerma, Mechrouha, Medjaz Amar, Nechmeya and Bordj Sabbath stations with magnitudes of trends equal, respectively, to 0.0099, 0.0038, 0.0004, 0.0054, 0.0129 and 0.0482.

According to Sen slope estimates at 5% level of significance (Tab. 2), only Ain Makhlof station showed a negative trend (-0.461). The other stations showed significant positive trends ranging from 0.219 (Heliopolis) to 24.844 (Mechrouha).

Table 4 illustrates the results of the change point test of Pettitt conducted on the mean annual rainfall of the 13 stations of the Seybouse watershed.

Table 4. Results of Pettitt test

Station	<i>p</i> -value	Year	Trend
Pont Bouchet	0.0472	2001	H_a
Ain Berda	0.1255	2001	H_o
Bouchegouf	0.3865	1994	H_o
Boukamouza	0.2941	2000	H_o
El Kerma	0.0044	2001	H_a
Guelma	0.6165	2001	H_o
Heliopolis	0.7774	2001	H_o
Mechrouha	0.0001	1996	H_a
Medjaz Amar	0.0116	1982	H_a
Nechmeya	0.0113	1989	H_a
Ain Makhlof	0.9056	–	H_o
Charef	0.1645	–	H_o
Bordj Sabbath	0.1063	2001	H_o

Explanations: H_a = heterogeneous series, H_o = homogenous series.
Source: own study.

The results show that the mean annual rainfall series of Pont Bouchet, El Kerma, Mechrouha, Medjaz Ammar and Nechmaya stations have significant change points that occurred between 1982 and 2001 (Fig. 2), the hypothesis of homogeneity is rejected for these stations at 5% level of significance. The test indicated also that the hypothesis of homogeneity is valid in the other stations as Non-significant change points were detected in their rainfall series (p value ≥ 0.05).

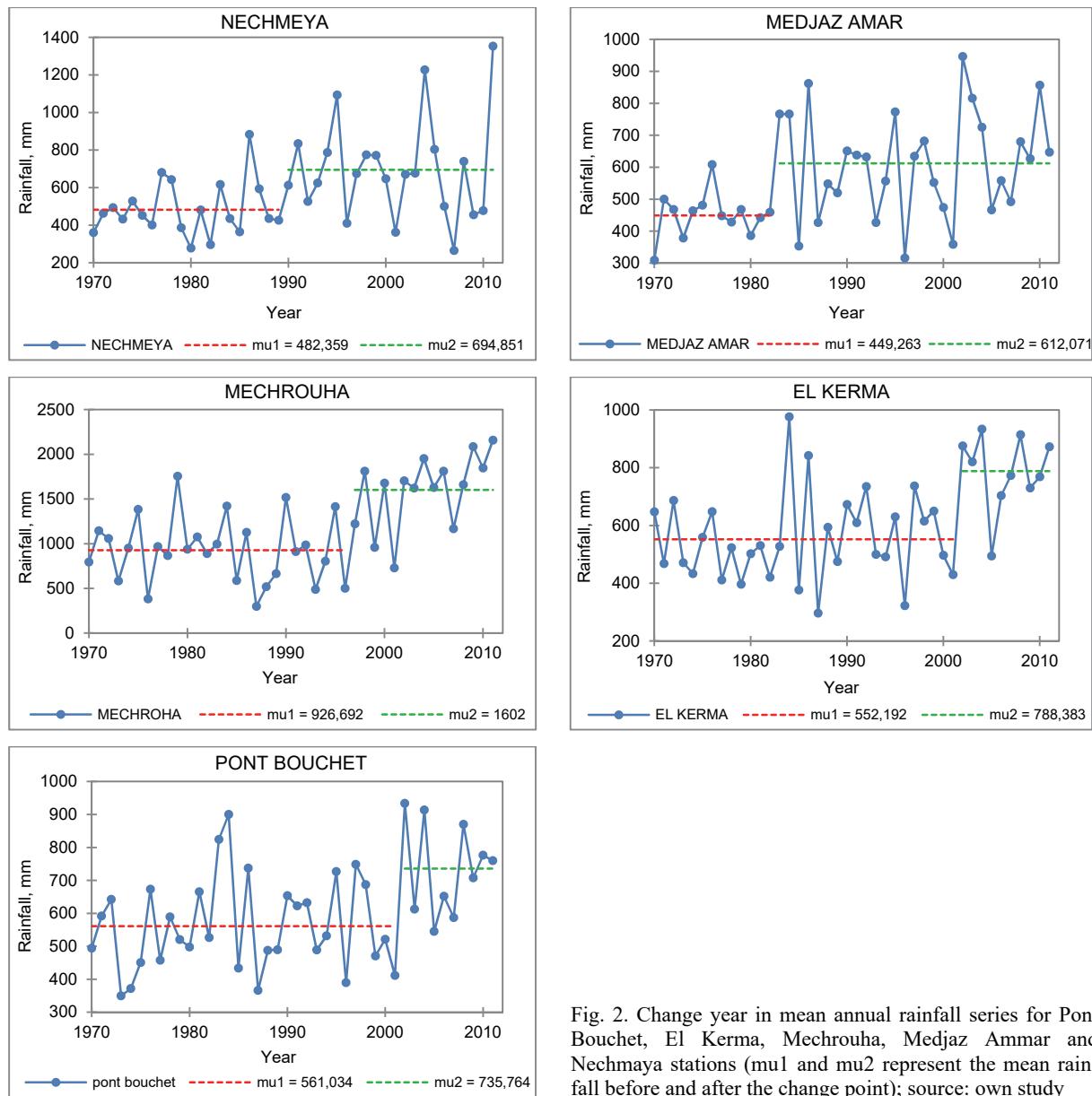


Fig. 2. Change year in mean annual rainfall series for Pont Bouchet, El Kerma, Mechrouha, Medjaz Ammar and Nechmaya stations (μ_1 and μ_2 represent the mean rainfall before and after the change point); source: own study

RAINFALL ANALYSIS BY PLUVIOMETRIC INDEX

The *SPI* indices were calculated for the 13 rainfall stations of the Seybouse basin in order to differentiate dry, normal, and wet periods and to better evaluate the variations in the annual rainfall over the Seybouse basin.

In the 70s, the 80s and early 90s, with the exception of Mechrouha station, we observed mostly negative *SPI* values which are often less than -1 (Fig. 3).

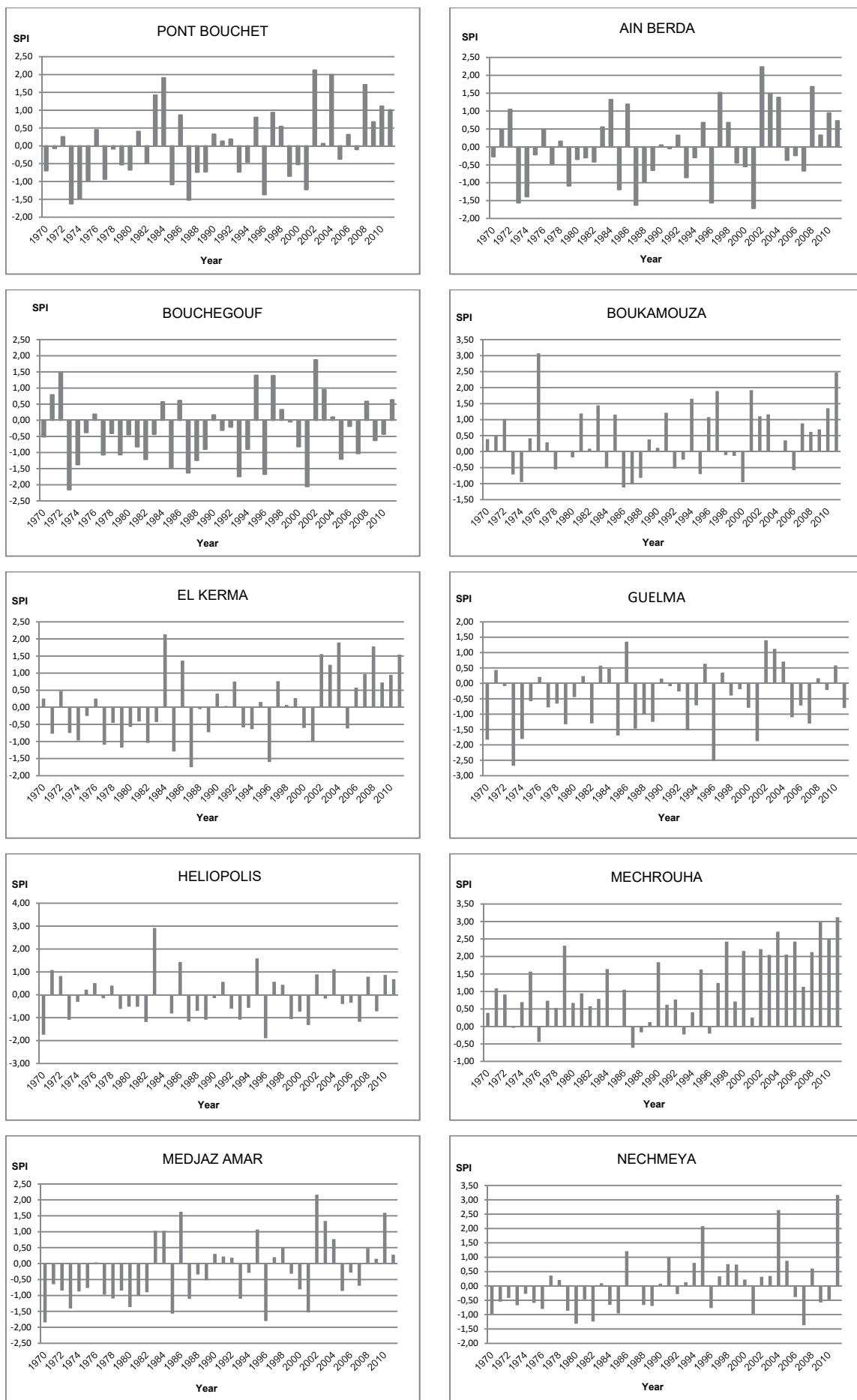
In the mid-90s until 2011, with the exception of Ain Makhlouf and Guelma stations, we observed mostly positive *SPI* values which are often greater than 1 , negative *SPI* values are less frequent (Fig. 3).

According to the table below which presents the statistical characteristics of the 5 years average *SPI* indices, the studied period can be divided in two sequences; a dry sequence that begins in 1970 and ends in 1994 with negative average *SPI* values that range

from -0.54 to -0.07 , and a wet sequence from 1995 to 2011 with positive average *SPI* values that range from 0.06 to 0.85 .

Figure 4 illustrates the spatial and temporal variability of the pluviometric indices over the Seybouse basin; the maps were created in geographic information system (GIS) environment by interpolating *SPI* values of the 13 stations using a Kriging interpolation type.

According to the *SPI* maps, during the period 1970–1994, deficit of rainfall associated with (i) moderately dry conditions were widely observed through the Seybouse watershed, (ii) and with extremely dry conditions recorded in some limited areas (Medjaz Ammar in 1970–1974 and Charef in 1985–1989). This period was also marked by an excess of rainfall associated with moderately wet conditions which was persistent in the central-eastern area (Mechrouha).



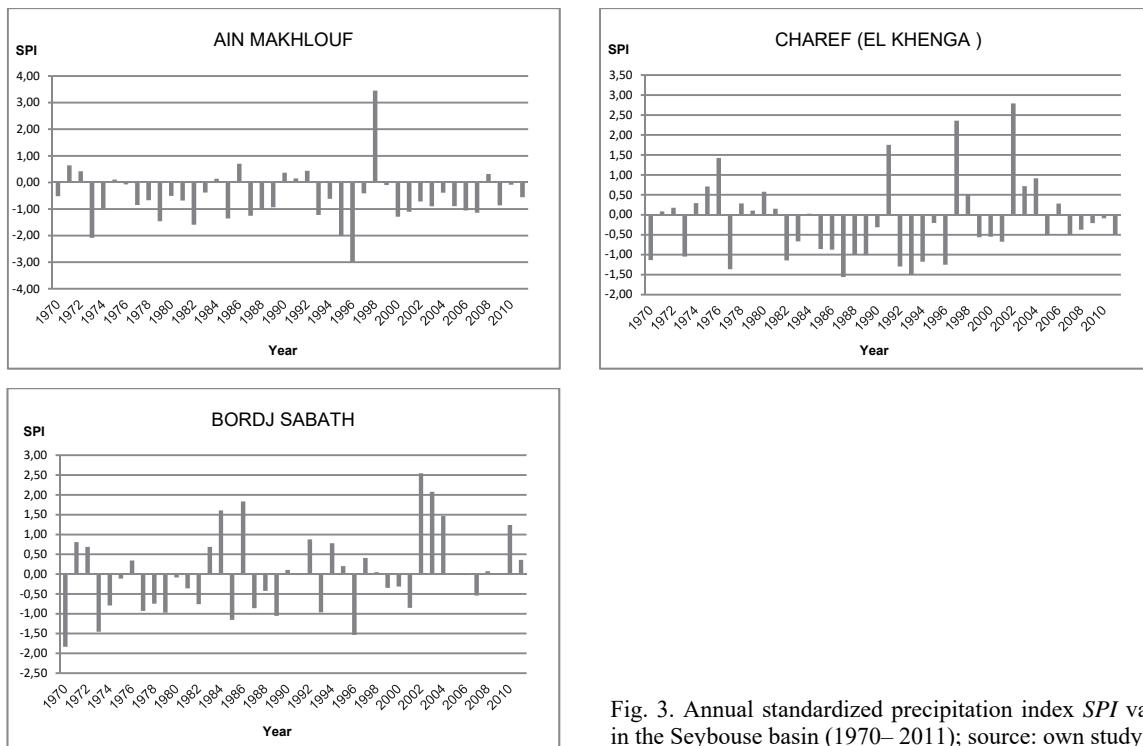


Fig. 3. Annual standardized precipitation index *SPI* values in the Seybouse basin (1970–2011); source: own study

Table 5. Statistical characteristics of the 5 years average *SPI* values for the study area

Characteristics	Dry cycle					Wet cycle				1970–2011
	1970–1974	1975–1979	1980–1984	1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	2010–2011	
Average	-0,43	-0,21	-0,003	-0,54	-0,07	0,12	0,46	0,06	0,85	0,03
Minimum	-1,19	-0,73	-0,72	-1,06	-0,60	-0,42	-0,88	-0,73	-0,32	-1,19
Maximum	0,61	0,94	0,92	0,07	0,68	1,16	1,88	2,14	2,81	2,81
Standard deviation	0,46	0,52	0,47	0,31	0,39	0,44	0,63	0,76	0,89	0,19
Average deviation	0,32	0,42	0,37	0,25	0,30	0,32	0,41	0,54	0,64	0,09

Source: own study.

During the period 1995–2011, a gradually return to normal precipitation is observed; moderately wet and very wet conditions were recorded in the most areas of the Seybouse watershed, with different spatial extents. Though, the deficit of rainfall persists in the center of the basin (Guelma, Ain Makhlof) over the entire period.

CONCLUSIONS

In this study drought analysis was conducted in the Seybouse watershed for the period between 1970 and 2011 by analysing rainfall data using non-parametric tests and the *SPI* method.

The statistical analysis of the rainfall data indicated that the evolution of the mean annual rainfall series is characterized by significant irregularities expressed by significant coefficients of variation and a statistically significant increase in the mean annual rainfall. As well, the climatic variability in the study area was confirmed by the Pettitt test which detected the presence of shifts in the mean annual rainfall series. These shifts were significant at 5 stations from the 13 stations under study.

According to the standardized precipitation index calculations the studied period was divided in two sequences; a dry sequence from 1970 to 1999, and a wet sequence from 1999 to 2011, which is in good agreement with the results obtained by LABORDE [1993]. Which noted a significant rainfall downward in the North of Algeria after the 70s and agrees as well with the studies of KHOUALDIA *et al.* [2014] which indicated the return of normal precipitation between 2001 and 2007

The interpolation of *SPI* indices on the entire basin shows a heterogenous distribution of rainfall through the Seybouse basin either in the dry cycle or in the wet cycle and showed that the central part of the Seybouse basin was affected by persistent drought conditions.

The study results constitute valuable material that can be used in forecasting droughts in the Seybouse watershed which permits effective planning and management of water resources and agriculture activities, and moreover, elaborating adaptation measures to face drought periods.

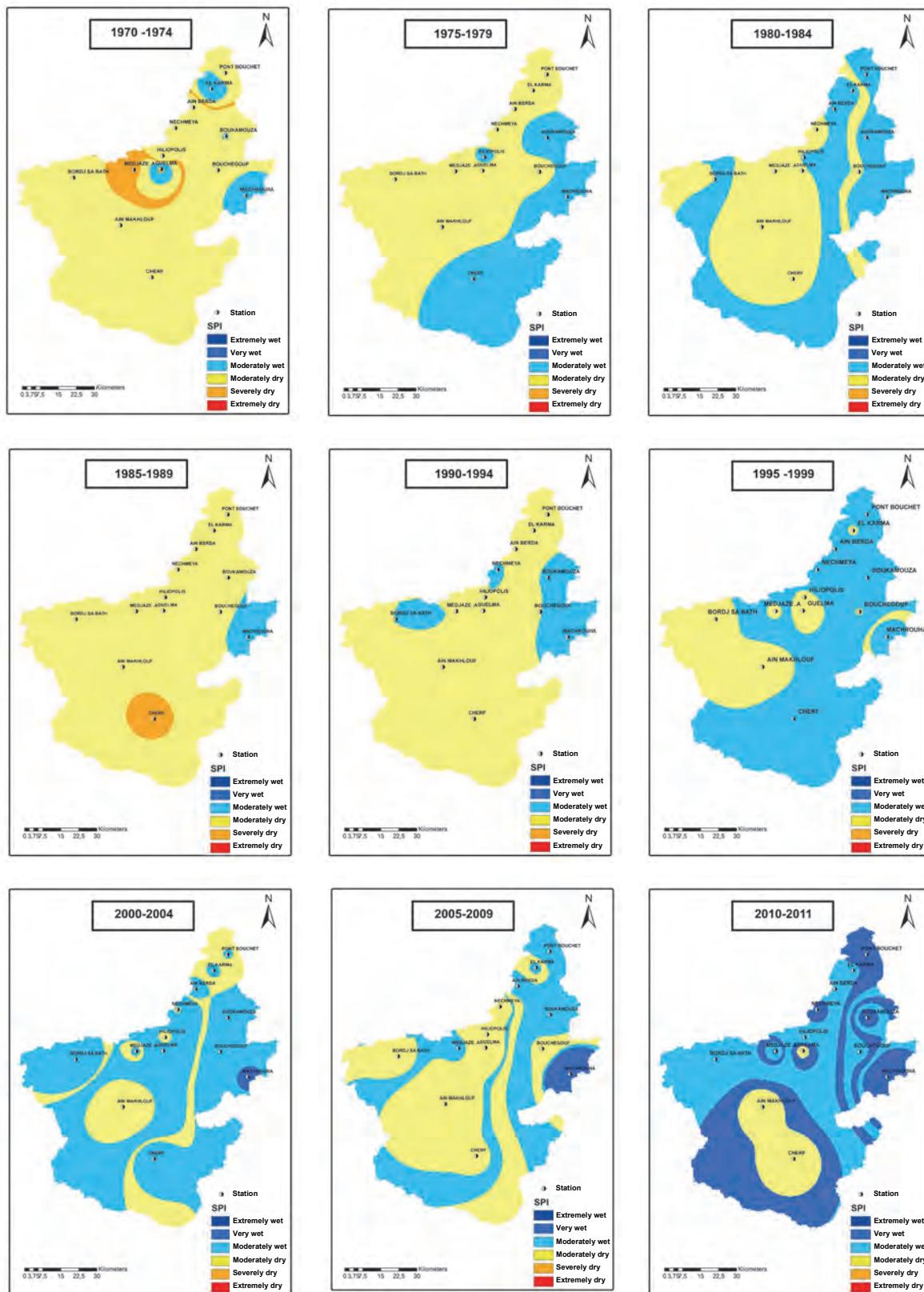


Fig. 4. Spatiotemporal monitoring of drought using standardized precipitation index (SPI), 1970–2011; source: own study

REFERENCES

- ALI A., LEBEL T. 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. International Journal of Climatology. Vol. 29. No. 12 p. 1705–1714.
- ARDOIN-BARDIN S. 2004. Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne [Hydro-climatic variability and its impacts on the water resources of large watersheds in the Soudan-Sahelian area]. Doctoral dissertation. Paris. UNESCO.
- ARDOIN-BARDIN S., DEZETTER A., SERVAT E., MAHE G., PATUREL J.E., DIEULIN C., BOYER J.F. 2003. Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d'espace [Analysis of the variability of water resources in the Africa's West Sahelian using hydrological modeling at large time and space steps]. Journal de l'Eau et de l'Environnement. Vol. 3 p. 5–13.
- AWANGE J.L., MPELASOKA F., GONCALVES R.M. 2016. When every drop counts: Analysis of droughts in Brazil for the 1901–2013 periods. Science of the Total Environment. Vol. 566 p. 1472–1488.
- BALLING JR R.C., VOSE R.S., WEBER G.R. 1998. Analysis of long-term European temperature records 1751–1995. Climate Research. Vol. 10. No. 3 p. 193–200.
- BERGAOUI M., ALOUINI A.W.S. 2002. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie [Characterization of meteorological and hydrological droughts: Case of Silana basin in Tunisia]. Science et changements planétaires/Sécheresse. Vol. 12. No 4 p. 205–213.
- BONACCORSO B., BORDI I., CANCELLIERE A., ROSSI G., SUTERA A. 2003. Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily. Water Resources Management. Vol. 17. No. 4 p. 273–296.
- DOUGLAS E.M., VOGEL R.M., KROLL C.N. 2000. Trends in foods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. Journal of Hydrology. Vol. 240 p. 90–105.
- EDWARDS C.D.C., MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1997. Historical analysis of drought in the United States. In 77th Conference on climate variations, 77th AMS Annual Meeting, 2–7 February. Long Beach, California. Vol. 27 p. 129–139.
- FNIGUIRE F., LAFTOUIH N.E., SAIDI M.E., ZAMRANE Z., EL HIMER H., KHALIL N. 2016. 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 p. 1–10. DOI: 10.1007/s00704-016-1873.
- ISHAK E.H. 2014. Effects of climate variability and change on flood magnitude and frequency in Australia. PhD thesis. Sydney, Australia. University of Western Sydney.
- HAN ZHOU, YUANBO LIU 2016. SPI based meteorological drought assessment over a humid basin: Effects of processing schemes. Water. Vol. 8. Iss. 9, 373. DOI: 10.3390/w8090373.
- HAYES M.J., WILHITE D.A., SVOBODA M.D., WILHITE D.A., VANYARKHO O.V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 80. No. 3 p. 429–438.
- HE M., GAUTAM M. 2016. Variability and trends in precipitation, temperature and drought indices in the State of California Hydrology. Vol. 3. No. 2, 14. DOI: 10.3390/hydrology3020014.
- HIRSCH R.M., SLACK J.R. 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. Water Resources Research. Vol. 20. No. 6 p. 727–732.
- HISDAL H., STAHL K., TALLAKSEN L.M., DEMUTH S. 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent. International Journal of Climatology. Vol. 21. No. 3 p. 317–333. DOI: 10.1002/joc.619.
- KENDALL M.G. 1975. Rank correlation methods. 4th ed. London. Charles Griffin pp. 202.
- KETTAB A., MOUHOUB A., OUARDA T., BOBBEE B. 2004. Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie [Contribution to the study of the drought phenomenon in the littoral of Algeria]. Colloque international sur l'eau. Chlef, 05/06/ février, Algérie p. 12.
- KHOUALDIA W., DJEBBAR Y., HAMMAR Y. 2014. Caractérisation de la variabilité climatique: cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien) [Climatic variability characterisation: Case of Medjerda watershed (northeastern Algeria)]. Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie. Vol. 29. No. 1 p. 6–23.
- LABORDE J.P. 1993. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500 000, Notice explicative. Project PNUD/ALG/88/021. Alger. Agence nationale des ressources hydrauliques [Explicative notice Algiers, the National Agency of Hydraulic Resources]. Pluviometric map of Northern Algeria scale of 1/500 000.
- MANN H.B. 1945. Nonparametric test against trend. Econometrica. Vol. 13 p. 245–259.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In: Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology, AMS, Dallas, TX p. 233–236.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA. AMS p. 179–184.
- MEDDI M., HUBERT P. 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie [Impact of rainfall regime change on water resources in North-western Algeria]. Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium. Montpellier, April 2003. IAHS Publications. No. 278 p. 229–235.
- MEDJERAB A., HENIA L. 2005. Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie Nord-occidentale [Regionalization of annual rainfall in North-western Algeria]. Revue Géographique de l'Est. Vol. 45. No 2.
- MOREIRA E.E., PIRES C.L., PEREIRA L.S. 2016. SPI drought class predictions driven by the North Atlantic Oscillation Index Using Log-Linear Modeling. Water. Vol. 8. Iss. 2, 43. DOI: 10.3390/w8020043.
- NICHOLSON S.E. 1989. Long term changes in African rainfall. Weather. Vol. 44. No 2 p. 46–56.
- OBA G., LUSIGI W.J. 1987. An overview of drought strategies and land use in African pastoral systems. Overseas, Development Institute Agricultural Administration Unit. Paper 23a pp. 29.
- PALMER W.C. 1965. Meteorological drought. Weather Bureau. Research Paper. No. 45 pp. 58.
- PATRA J.P., MISHRA A., SINGH R., RAGHUWANSI N.S. 2012. Detecting rainfall trends in twentieth century (1871–2006) over Ormoa State, India. Climatic Change. Vol. 111. No. 3–4 p. 801–817.

- PETTITT A.N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. Vol. 28. No. 2 p. 126–135.
- PINGALE S., ADAMOWSKI J., JAT M., KHARE D. 2015. Implications of spatial scale on climate change assessments. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 26. No. 1 p. 37–55.
- PINGALE S.M., KHARE D., JAT M.K., ADAMOWSKI J. 2016 Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 28. No. 1 p. 3–18.
- SALARIAZI M., AKHOND-ALI A.M., ADIB A., DANESHKHAH A. 2012. Trend and change-point detection for the annual stream-flow series of the Karun River at the Ahvaz hydrometric station. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 7. No. 32 p. 4540–4552.
- SEN P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 63. No. 324 p. 1379–1389.
- SIRCOULON J. 1976. Les données hydro-pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale: Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940" [Hydro-pluviometric data of the recent drought in tropical Africa: Comparison with drought of 1913 and 1940]. Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie. Vol. 13. No. 2 p. 75–174.
- TAXAK A.K., MURUMKAR A.R., ARYA D.S. 2014. Long term spatial and temporal rainfall trends and homogeneity analysis in Wainganga basin, Central India. *Weather and Climate Extremes*. Vol. 4 p. 50–61.
- VAN ROOY M.P. 1965. A rainfall anomaly index (*RAI*) independent of time and space. *Notos*. Vol. 14 p. 43–48.
- VINNIKOV K.Y., GROISMAN P.Y., LUGINA K.M. 1990. Empirical data on contemporary global climate changes (temperature and precipitation). *Journal of Climate*. Vol. 3. No. 6 p. 662–677.
- WILHITE D.A., GLANTZ M.H. 1985. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*. Vol. 10. No. 3 p. 111–120.
- WU H., HAYES M.J., WILHITE D.A., SVOBODA M.D. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 80. No. 3 p. 429–438.
- WU H., SOH L.K., SAMAL A., CHEN X.H. 2008. Trend analysis of stream flow drought events in Nebraska. *Water Resources Management*. Vol. 22. No. 2 p. 145–164.
- YUE S., PILON P. 2004. A comparison of the power of the test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 49. Iss. 1 p. 21–37.
- ZHAI P.M., PAN X.H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*. Vol. 58. No. S1 p. 1–10.
- ZHOU H., LIU Y. 2016. SPI based meteorological drought assessment over a humid basin: Effects of processing schemes. *Water*. Vol. 8. No. 9 p. 1–16.

Amina KHEZAZNA, Hocine AMARCHI, Oussama DERDOUS, Fouad BOUSAKHRIA

Monitorowanie suszy w basenie Seybouse w Algierii w ciągu ostatnich dziesięcioleci

STRESZCZENIE

Algieria jest jednym z krajów Afryki najsilniej doświadczanych przez wpływ zmian klimatu, w szczególności przez susze, które w minionych dziesięcioleciach powodowały znaczne straty gospodarcze. W prezentowanych badaniach przeprowadzono monitoring susz w latach 1970–2011 w zlewni rzeki Seybouse, analizując zmienność i trendy rocznych opadów oraz obliczając standaryzowany indeks opadów (*SPI*). Wyniki dowodzą dużej zmienności opadów między latami i ukazują istotną tendencję wzrostową. Oszacowane wskaźniki suszy wskazują, że zlewnia Seybouse doświadczała w przeszłości długich okresów umiarkowanej suszy, po których następował długi okres wilgotnej pogody na większości badanych obszarów. Ponadto, interpolacja standaryzowanego wskaźnika opadu na całą zlewnię Seybouse za pomocą GIS umożliwiła wizualizację i ocenę rozwoju suszy w regionie. Powinno to pomóc decydentom w zarządzaniu zasobami wodnymi, rolnictwem i innymi rodzajami działalności, które mogą być zależne od suszy.

Slowa kluczowe: *GIS, standaryzowany indeks opadu (SPI), susza, zlewnia Seybouse, zmiany klimatu*