

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechniques

Département Hydraulique



PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en hydraulique

**Contribution à l'étude de la variabilité et de l'évolution de
la pluviométrie sur le littoral Algérien**

Présenté par :

LAZZOUZI Samir

Encadré par :

Pr. BERMAD Abdelmalek

Devant le jury composé de :

Président :

Pr. BENYOUSSEF. E.H

Examineurs :

Dr. LEFKIR. A

Mr. BENZIADA.S

Juin 2015

A

**La mémoire
de YAYA BAYA**

Remerciements

Tout d'abord je remercie le bon **DIEU** pour m'avoir donné le courage, la volonté et la force d'accomplir ce travail et arriver à ce stade du savoir.

J'exprime mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à la réalisation de ce modeste travail en particulier :

- Mon promoteur, enseignant, deuxième père, le **Pr. BERMAD Abdelmalek** pour la formation solide qu'il m'a dispensé durant mes trois années à l'**Ecole Nationale Polytechnique**, pour sa contribution active à ce travail. Je tiens à le remercier également pour sa patience, sa gentillesse, son sérieux, sa bonne humeur, le temps infini qu'il m'a consacré et son suivi rigoureux durant la réalisation de cette thèse. Ses conseils, son soutien et ses encouragements ont été des éléments clés pour finaliser ce travail. Vous êtes ma fierté cher professeur !
- A **Mr. HALIMI** de l'**ONM** pour son aide en termes de données et informations.
- Pour le **Pr. BENYOUSSEF** d'avoir accepté la présidence du jury et les examinateurs qui me font l'honneur d'évaluer mon travail.

Je saisis l'occasion pour remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire et à ce jour.

J'adresse mes sincères remerciements à **Mr. TAHMI** le directeur des études de l'**ENP** pour son comportement exemplaire avec les étudiants de l'école. Il n'a jamais su dire non pour les choses dont l'intérêt des étudiants est prioritaire.

Je remercie l'ensemble du personnel de la bibliothèque.

Je remercie **Mme BELAHDA Mouna** la secrétaire du département hydraulique pour ses sacrifices et efforts fournis aux services des étudiants.

Je remercie mes parents qui m'ont toujours soutenue, encouragé et qui ont tant peiné pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui.

Je remercie également mes deux frères **Arezki** et **Mohamed** pour leur présence à chaque instant de ma vie.

Je remercie enfin les membres de ma famille, mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu durant les moments difficiles.

Dédi Sam

Ce modeste travail n'aurait jamais pu se réaliser sans le soutien continu de ma petite famille et sans leur éducation basée sur des valeurs morales fondées sur le respect des autres et du travail.

A mes très chers parents, vos : sacrifices, encouragements, soutiens, conseils, m'ont permis d'atteindre cette étape de ma vie, vous êtes ma source d'inspiration, ma force et ma persévérance. Tous les remerciements du monde ne suffiraient pas à rendre la pareille. Avec tout mon amour.

A mes frères : Arezki & Mohamed, votre présence, votre bonne humeur et dynamisme m'ont permis de ne jamais baisser les bras, quand la fatigue prenais le dessus. Avec toute mon affection.

A mes deux oncles Mohamed et Mohamed ainsi que leurs femmes : Nassima et Ouerida, qui ont su me conseiller et m'épauler quand j'en avais besoin.

A mes petits bouts de chou : Lyna, Ines et Chakib qui me redonnent le sourire à chaque instant.

Il ne nous est pas souvent donné l'occasion de remercier les personnes qui nous sont chères et qui ont une influence sur nos pensées et plus généralement sur notre vie. Je tiens donc à adresser ici mes salutations sincères à tous les membres de ma famille, qui m'ont tous encouragé à un moment ou à un autre et qui y ont participé chacun à sa manière: A toute la famille Lazzouzi & Sbagoud. Je vous dis : Merci.

A mes très chers fidèles amis : Malek, Abdénour et Mourad, je ne saurais comment vous remercier, votre attention, votre présence, et votre disponibilité me font chaud au cœur.

A mes chères Sœurs de cœur : Maissa, Boutheina, Imane et Lylija je vous remercie pour votre soutien inconditionnel, et vos encouragements tout au long des années.

Je tiens à exprimer ma vive gratitude A mes amis de l'EPSTA : Issam, Mahrez, Nazim, Fayçal, El hachemi, Nawel, Imane, Naila, Neila, Anouar, Lotfi, Sadek, Rabah, je n'oublierai jamais nos moments d'ambiance à l'Ecole préparatoire et polytechnique.

A Mes amis de l'école Polytechnique : Salim, Lyes, Marwen, Chakib, Racheda, Samira, Inàam, Wafa, Salah, Fella, Amine, Ghizlene, Hanane, Oussama, Youcef, Ali, Lamine, Zaki. Cela fut un vrai plaisir de vous connaître, et de faire partie de vos vies.

A mes amis de ma promotion ENP 2015 : Hocine, Samy, Ahcene, Oussama, Tariq, Karim, Youcef, Youcef, Slimane, Amine, Kahina, Siham, Sohaib, Housseem, Nacer, Amel, Malek, Amina, Sabah. Nos moments uniques et inoubliables resteront gravés dans ma mémoire.

Je saurais oublier dans cet énoncé, les membres du CAP, Alumni Day & WikiStage Algiers : Ce fut une fierté pour moi d'avoir assuré la réussite des événements du CAP avec vous.

Que ce travail apporte la fierté méritée à ma maman, mon papa, à mes frères et à 'Moi-même'!

ملخص

تمت دراسة معمقة لتغيرات تساقط الأمطار باستعمال معطيات عشر محطات قياس من الساحل الجزائري بعد معالجة البيانات التي تم جمعها، قمنا بتحليلها بواسطة المعايير الإحصائية، إختبارات تغير السلوك وسلاسل ماركوف

هذا يسمح لنا بتسليط الضوء وإستخلاص الإختلافات الملاحظة بين جهات المنطقة المعنية بالدراسة فضلا عن التغيرات المحتملة في أنماط سقوط الأمطار بها

الكلمات الدلالية: التساقط، الساحل الجزائري، المعايير الإحصائية، الإختبارات، سلاسل ماركوف

Résumé

Une étude approfondie du régime pluviométrique a été élaborée à partir de dix (10) stations météorologiques du littoral Algérien.

Après avoir traité les données collectées, une approche fondée sur les paramètres statistiques, les tests de changement de comportement et les chaines de Markov appliquées aux données historiques a été développée.

Cela nous a permis de ressortir les différences constatées entre les régions de la zone d'étude prise en considération, ainsi que les éventuels changements du régime pluviométrique.

Mots clés: Régime pluviométrique, littoral Algérien, Tests, paramètres statistiques, Chaines de Markov.

Abstract

A detailed study of the rainfall regime was developed from ten (10) of the Algerian coastal weather stations.

After processing the data collected, an approach based on statistical parameters, behavior change tests and Markov chains applied to historical data was developed.

This allowed us to highlight the differences between the regions of the study area as well as potential changes in rainfall regime.

Keyword: Rainfall regime, Algerian coastal, statistical parameters, Tests, Markov Chains.

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Les changements climatiques :	5
I.1.1. Introduction :	5
I.1.2. Le climat et le temps :	6
I.1.3. Le système climatique :	6
I.1.4. La variabilité climatique :	7
I.1.5. Changement climatique :	7
I.1.6. Prévision du changement climatique :	7
I.1.7. Les causes des changements à l'échelle du globe :	7
I.1.7.1. Les causes naturelles susceptibles d'affecter le climat:	7
I.1.7.2. Les causes artificielles	8
I.1.8. Quelques scénarios envisagés dans cet axe	8
I.1.9. Les conséquences du réchauffement	9
I.1.10. Impact du changement climatique sur l'agriculture	9
I.1.10.1. Extrêmes climatiques	9
I.1.10.2. Réduction de l'eau du sol disponible	10
I.2. La sécheresse	10
I.2.1. Définition de la sécheresse	10
I.2.1.1. En agriculture	10
I.2.1.2. En météorologie	10
I.2.1.3. En hydrologie	10
I.2.2. Les indices de la sécheresse	11
I.2.3. Les causes de la sécheresse	11
I.2.3.1. Le phénomène ENSO	12
I.2.3.2. L'Oscillation Nord Atlantique (ONA).....	12
I.2.4. L'impact de la sécheresse.....	13
I.2.4.1. Problème d'approvisionnement en eau	13
I.2.4.2. La surexploitation des aquifères	13

I.2.4.3. Effets sur le sol	13
I.2.4.4. Impact sur le secteur agricole et l'élevage	13
I.2.4.5. Impact sur la santé humaine	14
I.2.5. La sécheresse en Algérie	14
I.3 Les précipitations en Algérie	16

Chapitre II : Collecte et critique des données

II.1 Introduction	20
II.2 Inventaire des données disponibles	20
II.2.1 Critères de sélection des stations	21
II.2.2 Stations retenues après sélection préliminaire	21
II.3 Critiques des données	23
II.3.1 Introduction.....	23
II.3.2 Méthodes de comblement de lacunes	24
II.3.2.1 Calcul de la moyenne mensuelle interannuelle	24
II.3.2.2 Méthode de la régression linéaire simple	25
II.3.2.3 Simulation à partir de la fonction de répartition.....	26
II.3.3 Comblement de lacune.....	27
II.3.3.1 Comblement par la moyenne Mensuelle Interannuelle.....	27
II.3.3.3 Comblement par la régression linéaire.....	28
II.3.3.3 Comblement par simulation	29
II.3.4 Détection des valeurs singulières.....	29
II.3.4.1 Présentation du test de Grubbs et Beck	30
II.3.4.2 Analyse des résultats	31
II.4 Traitement statistique des données.	31
II.4.1 Test d'indépendance	31
II.4.1.1 Test de Wald-Wolfowitz	32
II.4.1.2 Analyse des résultats du test.....	32
II.4.2 Test d'homogénéité des fichiers	33
II.4.2.1 Test du double cumul (Quélenec (1973)).....	33
II.4.2.2 Analyse des résultats	34
II.5 Conclusion	35

Chapitre III : Analyse du régime pluviométrique par les paramètres statistiques

III.1 Introduction	36
--------------------------	----

III.2 Evolution de la pluviométrie	36
III.3 Analyse temporelle des séries pluviométriques	36
III.3.1 Pas de temps annuel.....	37
III.3.1.1 Période Totale.....	37
III.3.1.2. Etude sur 4 périodes.....	43
III.4 Evolution du régime pluviométrique.....	46
III.4.1 METHODOLOGIE	46
III.4.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	49
III.4.2.1 Ecart à la moyenne (E_m)	49
III.4.2.2 Indice de pluviosité (I_p).....	52
III.4.2.3 Indice Standardisé de Précipitation (SPI)	54
III.4.2.4 Moyenne Mobile (M_m)	61
III.5 Conclusion.....	63

Chapitre IV : Traitement des données pluviométriques par les tests statistiques

IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Synthèse bibliographique	64
IV.2.1 Tests du caractère aléatoire des séries chronologiques	65
IV.2.1.1 Test du rapport de VON NEUMANN.....	66
IV.2.1.2 Test des changements de signe	66
IV.2.1.3 Test de corrélation sur le rang.....	67
IV.2.1.4 Test T de Student ou test de la différence de deux moyennes.....	68
IV.2.1.5 Test de Cramer.....	68
IV.2.1.6 Test de l'Autocorrélogramme.....	69
IV.2.2 Tests de détection des ruptures.....	70
IV.2.2.1 Test de Pettitt (Pettitt, 1979).....	70
IV.2.2.2 Méthode bayésienne de Lee & Heghinian.....	71
IV.2.2.3 Statistique U de Buishand.....	71
IV.2.2.4 Procédure de segmentation d'Hubert.....	72
IV.2.3 Synthèse des Méthode retenues.....	73
IV.3 Résultats et analyses.....	74
IV.3.1 Tests sur le caractère aléatoire.....	74
IV.3.1.1 Test de corrélation sur le Rang	75
IV.3.1.2 Test de l'autocorrélogramme	75

IV.3.2 Tests de détection des ruptures.....	77
IV.3.2.1 Tests de Pettitt (Pettitt 1979), Lee & Heghinian et Segmentation d'Hubert	77
IV.3.2. Test de Buishand et l'Ellipse de Contrôle Associée.....	79
IV.4 Conclusion	82
Chapitre V : Analyse du régime pluviométrique par les chaines de Markov	
V.1 Introduction	84
V.2 Les modèles binaires	85
V.2.1 Les modèles d'ordre 0	85
V.2.1.1 Exemple de construction d'une chaine de Markov d'ordre 0	85
V.2.2 Les modèles d'ordre 1	86
V.2.3 Les modèles d'ordre 2	87
V.2.4 Les modèles d'ordre 3	87
V.3 Analyse du régime pluviométrique sur le littoral Algérien par les chaines de Markov	88
V.3.1 Par station	88
V.3.1.1 Chaines de Markov d'ordre 0.....	88
V.3.1.2 Chaine de Markov d'ordre 1	89
V.3.1.3 Les chaines de Markov d'ordre 2.....	91
V.3.1.4 Chaines de Markov d'ordre 3.....	93
V.3.2 Application des chaines de Markov à l'échelle régionale	94
V.3.2.1 Les chaines de Markov d'ordre 2.....	95
V.3.2.2 Les chaines de Markov d'ordre 3.....	95
V.4 Conclusion.....	97
Conclusion générale.....	98

Références bibliographiques

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Présentation des stations étudiées

Tableau II.2 : Stations retenues après sélection.

Tableau II.3 : Comblement par la moyenne mensuelle interannuelle

Tableau II.4 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Moyenne Mensuelle Interannuelle).

Tableau II.5 : Coefficients de détermination inter-Stations.

Tableau II.6 : Comblement des lacunes mensuelles par la régression linéaire pour la station d'Arzew.

Tableau II.7 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Régression Linéaire).

Tableau II.8 : Comblement de lacunes de la station d'Arzew par simulation.

Tableau II.9 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Simulation).

Tableau II.10 : Résultats du test de Grubbs et Beck

Tableau II.11 : Résultats du test d'indépendance de Wald-Wolfwitz.

Tableau III.1 : Paramètres statistiques des stations étudiées.

Tableau III.2 : Maxima, Minima et Intervalles de variation des précipitations par station.

Tableau III.3 : Variation des précipitations par station

Tableau III.4 : Répartition des pluies par régions.

Tableau III.5 : Paramètre statistiques pour les 4 périodes.

Tableau III.6 : Répartition des pluies par région et par période (12 ans).

Tableau III.7 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).

Tableau III.8 : Caractéristiques de la période sèche pour les différentes stations (1970-2014)

Tableau III.9 : Caractéristiques de la période humide pour les différentes stations (1970-2014)

Tableau III.10 : Durée des périodes sèches dans les différentes stations (1970-2014)

Tableau III.11 : Durée des périodes humides dans les différentes stations (1970-2014)

Tableau III.12 : Evolution du régime pluviométrique annuel des différentes stations estimé à l'aide de l'indice de pluviosité (I_p)

Tableau III.13 : Caractérisation de la sécheresse par l'indice (SPI) des différentes stations pluviométriques

Tableau III.14 : Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI) sur le littoral Algérien

Tableau IV.1 : Valeurs des statistiques du test de corrélation sur le rang

Tableau IV.2 : Résultats des tests statistiques et calcul des déficits pour la pluie annuelle

Tableau IV.3 : Résultat de la segmentation d'Hubert

Tableau IV.4 : Résultats du Test de Buishand

Tableau IV.5 : Détection des années de ruptures par le Test de Buishand et l'ellipse de contrôle

Tableau V.1 : Matrice de passage d'ordre 1

Tableau V.2 : Matrice de passage d'ordre 2.

Tableau V.3 : Matrice de passage d'ordre 3.

Tableau V.4 : Matrice de Passage d'ordre 0 pour les 10 stations.

Tableau V.5 : Matrice de passage d'ordre 1 pour les 10 Stations par la méthode Q.

Tableau V.6 : Matrice de passage d'ordre 1 pour les 10 Stations par la méthode T.

Tableau V.7 : Matrice de passage d'ordre 2 pour les 10 stations par la méthode Q.

Tableau V.8 : Matrice de passage d'ordre 2 pour les 10 stations par la méthode T.

Tableau V.9 : Matrice de Passage d'ordre 3 pour les 10 stations par la méthode Q.

Tableau V.10 : Matrice de Passage d'ordre 3 pour les 10 stations par la méthode T.

Tableau V.11 : Matrice de passage d'ordre 2 par région par la méthode Q.

Tableau V.12 : Matrice de passage d'ordre 2 par région par la méthode T.

Tableau V.13 : Matrice de Passage d'ordre 3 par région par la méthode Q.

Tableau V.14 : Matrice de Passage d'ordre 3 par région par la méthode T.

Liste des figures

Figure II.1.a : Localisation des postes pluviométriques recueillis

Figure II.1.b : Localisation des postes pluviométriques retenus

Figure II.2.a : Pourcentage des lacunes dans les données pour chaque station à l'échelle mensuelle (1970-2014).

Figure II.2.b : Pourcentage des lacunes sur l'ensemble des stations (1970-2014)

Figure II.3 : Simulation à partir de la fonction de répartition.

Figure II.4.a : Test de double cumul Oran-Ghazaouet

Figure II.4.b : Test du double cumul Alger-Bejaia

II.4.c : Test du double cumul Annaba-Skikda

Figure III.1 : Evolution des pluies annuelles sur le littoral Algérien.

Figure III.2 : Moyennes interannuelles des pluies sur le littoral Algérien.

Figure III.3 : Variation des précipitations par station

Figure III.4 : Histogrammes de la pluviométrie par station.

Figure III.5 : Répartition des pluies par région.

Figure III.6 : Répartition des pluies Annuelles par période de 12 ans.

Figure III.7 : Moyennes des pluies annuelles des 3 régions pour des périodes de 12 ans.

Figure III.8 : Moyenne Mobile d'ordre 5.

Figure III.9 : Indice de l'écart à la moyenne

Figure III.10 : Variabilité interannuelle de la pluviométrie par station (1970 -2014).

Figure III.11 : Moyenne mobile d'ordres 5 et courbes de tendance

Figure IV.1 : L'autocorrélogramme et ses intervalles de confiance (90%, 95% et 99%) des stations

Figure IV.2 : Ellipse de Contrôle associée au test de Buishand

Figure V.1 Classement des pluies par la méthode des quintiles et la méthode des Terciles

Introduction Générale

Dans la Grèce Antique, Aristote (-384/-322 Av. JC) soutenait que l'eau alimentant la surface terrestre venait du fin fond des cavernes où le froid transforme l'air en eau, tandis qu'Anaxagore, de 150 ans son aîné, avait déjà admis que les pluies étaient la principale source d'alimentation des rivières. Rétrospectivement, l'erreur d'interprétation d'Aristote semble évidente, mais Nace (1969) lui accorde des circonstances atténuantes : Aristote vivait dans une région semi-aride et il ne pouvait imaginer facilement que la pluie fut plus qu'un appoint pour les fleuves et les sources.

Dès lors, le climat faisait partie intégrante des activités des anciennes civilisations.

Ces activités sont surtout liées au cycle de l'eau qui est une composante principale du système climatique. L'échange d'eau est permanent entre les quatre grands réservoirs d'eau de l'hydrosphère que sont les mers et océans, les eaux continentales (superficielles et souterraines), l'atmosphère, et la biosphère. Le moteur de ce cycle en est le soleil : grâce à l'énergie thermique qu'il émet, il active et maintient constamment les masses d'eau en mouvement. Ce cycle se divise en deux parties intimement liées :

- Une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau ;
- Une partie terrestre qui concerne l'écoulement de l'eau sur les continents, qu'il soit superficiel ou souterrain.

Lors du dernier siècle, 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.

Ainsi, la variabilité du climat et ses fluctuations sont devenues de réelles préoccupations pour les chercheurs depuis près de quatre décennies. En outre, plusieurs colloques et manifestations scientifiques ont été organisés pour étudier les accidents climatiques, pour confronter leurs résultats et essayer de mieux comprendre les mécanismes

qui les régissent. Le changement climatique est donc devenu un sujet fertile pour la recherche fondamentale en climatologie.

Cependant, pour mieux connaître le climat il est nécessaire de bien étudier et de caractériser la variabilité de ses éléments. Car cette variabilité peut devenir une contrainte économique pour les activités qui dépendent en grande partie des apports atmosphériques, notamment, les secteurs liés à la disponibilité en eau comme l'agriculture mais aussi les besoins en eau potable pour les populations.

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, en 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.

Ainsi depuis plus de trente ans, le littoral subit des déficits pluviométriques importants, qui ont particulièrement touché sa région Ouest avec des conséquences dramatiques liées aux déséquilibres importants des ressources en eau aussi bien quantitativement que qualitativement.

Dans le cadre du présent travail, qui consiste principalement à étudier la variabilité des pluies sur le littoral Algérien, de caractériser la sécheresse, d'identifier les tendances et les ruptures, sur la période 1970/2014. Nous avons, ainsi, entrepris une étude du régime pluviométrique sur le littoral Algérien pour pouvoir répondre aux questions suivantes :

1. Comment se comporte la variabilité spatio-temporelle des pluies ?
2. Quelle sont les tendances de l'évolution des pluies ?
3. Y'a-t-il des ruptures climatiques dans les séries pluviométriques ?
4. Si oui à combien se quantifie cette variation (réduction ou augmentation) ?
5. Comment se caractérisent les sécheresses climatiques sur le littoral Algérien (fréquences et sévérités) ?

Les réponses à ces questions ont permis d'élaborer ce mémoire qui s'articule autour de cinq chapitres :

i) Le premier propose une synthèse bibliographique sur la variabilité du régime pluviométrique dans le monde, la méditerranée et en Algérie. Nous avons résumé les principales conclusions des nombreuses études ayant traitées cette thématique.

ii) Un deuxième chapitre consacré à l'étude de la base de données. Ainsi nous avons vérifié la fiabilité des séries et nous avons effectué leur critique pour les valider et les exploiter.

iii) Le troisième chapitre présente la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles et régionales, détaille les résultats de l'application des indices pluviométriques pour la caractérisation de la sécheresse climatique sur le littoral Algérien.

iv) Le quatrième chapitre porte sur la vérification du caractère aléatoire et la détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

v) Enfin le dernier chapitre, est consacré à l'étude de la persistance de la sécheresse sur le littoral Algérien pour la période 1970/2014. L'approche qui a été appliquée, c'est les chaînes de Markov.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous résumons les principaux résultats de ce travail et les perspectives à développer.

Chapitre I

Recherche Bibliographique

L'étude du climat a toujours intéressé l'homme puisque 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 niveaux et domaines : ressources en eau, agriculture, sécurité alimentaire, santé, hygiène, stabilité...etc. (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 XIX^{ème} 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).

Selon le dernier rapport de l'IPCC (2012), le réchauffement global provoquera l'augmentation d'événements climatiques extrêmes et toucheront 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).

Depuis quelques années les débats scientifiques sur le climat se focalisent beaucoup plus sur le réchauffement climatique actuel et ses conséquences environnementales (Duplessy, 2001).

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 (Salinger, 1980 ; Jones et al., 2008). Citons l'exemple de Moonen et al. (2002) ; pour déterminer les risques du changement climatique en Italie, ils ont utilisé les paramètres climatiques classiques qui sont les températures maximales et minimales, événements d'averses, évaporation moyenne, et ont évalué le risque de sécheresse et les tendances temporelles pour toutes les variables en utilisant les techniques de régression linéaires. Leurs résultats indiquent une tendance à la hausse des températures et une baisse de la pluviométrie. Dans la même optique, Maheras (1981) et Wigley et al. (1984) ont passé en revue différentes méthodes de classifications englobant les caractéristiques temporelles du climat en Angleterre et ont appliqué une méthode appelée « linkage analysis » qui est hiérarchique et basée sur les corrélations entre les stations, mais seules les précipitations ont été analysées.

Ainsi des indicateurs de changements climatiques sont développés dans plusieurs centres et par plusieurs chercheurs. Parmi ces indices on peut citer les indices climatiques pluviométriques, (IPS, l'indice mensuel pluviométrique d'Angot, indice de Palmer, indice d'aridité, L'indice Musset-Gaussen...).

Il est à constater aussi que, l'IPCC (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 entrainera 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.

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 socioéconomiques 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 (El Bouqdaoui et al., 2006 ; Nicholson et Wigley, 1984).

L'Algérie et surtout l'Ouest, a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, les années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. La plus récente a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau.

I.1. Les changements climatiques :

I.1.1. Introduction :

Notre planète s'est formée voilà environ 4,5 milliards d'années. L'être humain est présent sur cette Terre depuis moins de deux millions d'années mais ce n'est que dans les 200 dernières années qu'il a exercé une influence notable et à grande échelle sur le milieu naturel planétaire.

L'environnement a commencé à se dégrader au sein des peuplements humains et autour des premières usines de la révolution industrielle mais, loin de ces endroits, la capacité de purification de l'écosystème suffisait à limiter la plupart des effets de la présence humaine. Toutefois, depuis la seconde guerre mondiale, cette situation a radicalement changé. La croissance démographique exponentielle, les progrès technologiques fulgurants et l'accroissement notable de la consommation en énergie comme ces matières premières font jouer au genre humain un rôle où ses activités quotidiennes modifient dans leur intégralité des systèmes globaux comme l'atmosphère et les océans, et ce à une vitesse que cette planète n'a jamais connue auparavant. Avant d'entamer la notion de changement climatique, on va définir certains concepts de base comme suit :

I.1.2. Le climat et le temps :

Le climat et le temps sont deux notions différentes. Le temps, c'est l'état de l'atmosphère défini par les éléments météorologiques : la température, les précipitations (la pluie, la neige, etc.), l'humidité, l'ensoleillement et le vent à un endroit précis.

Le climat, c'est l'ensemble des phénomènes météorologiques observés dans le passé et qu'on s'attend d'observer encore sur une longue période. On peut le définir aussi comme « la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée. »[Gibbs ; 1987].

Le climat a une influence sur tous les êtres vivants. Il régit le cycle biologique des plantes et des animaux, influe sur leur croissance et leur vitalité et est un des principaux facteurs qui déterminent leur répartition autour de la planète. Presque toutes les formes de vie sont adaptées pour vivre dans une zone climatique particulière et relativement limitée.

I.1.3. Le système climatique :

Le système climatique de la Terre se compose d'éléments en interaction complexe. L'élément moteur est le Soleil, dont l'énergie réchauffe la Terre. Cette énergie est à l'origine de la circulation atmosphérique et océanique ainsi que des processus d'évaporation et de précipitation qui font partie du cycle de l'eau. En plus de l'atmosphère et des océans, le système climatique englobe les eaux douces, les plantes, les animaux, les couvertures de glace et de neige, les masses terrestres et même la croûte terrestre.

I.1.4. La variabilité climatique :

Elle est représentée par les déviations des valeurs des événements observés par rapport à leur valeur moyenne pour l'état climatique contemporain.

I.1.5. Changement climatique :

Les changements climatiques sont décrits de façons différentes selon les auteurs. Souvent le changement du climat dénote une variation due à l'intervention humaine alors que le climat varie d'une façon naturelle sous l'influence de différents facteurs climatiques. On peut citer les facteurs astronomiques, les facteurs géographiques (relief, océan), les facteurs météorologiques (centre d'action). Aujourd'hui, l'homme est devenu un facteur de climat non négligeable par ces actions industrielles.

I.1.6. Prévision du changement climatique :

Comment les scientifiques peuvent-ils prévoir les effets à long terme du changement climatique, alors qu'on a encore beaucoup de mal à prévoir quotidiennement le temps qu'il fera? C'est à cause de la variabilité locale des conditions météorologiques que les prévisions du temps semblent imparfaites; les modèles du changement climatique ne tentent pas d'effectuer de telles prévisions détaillées et axées sur un lieu donné.

Il existe deux grandes méthodes de prévision du changement climatique possibles; la première est celle des analogues, qui consiste à comparer les conditions climatiques et hydrométriques passées et actuelles, et l'autre, beaucoup plus courante, fait appel à la simulation mathématique du climat (modèles climatiques) qui sont des modèles de circulation générale (MCG)).

I.1.7. Les causes des changements à l'échelle du globe :

Ces modifications ne sont toutefois pas toutes causées par les êtres humains. Des phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques peuvent provoquer des changements soudains dans les systèmes planétaires. Par contre, les bouleversements engendrés par l'espèce humaine peuvent être catastrophiques et avoir des impacts à l'échelle du globe (inondation, sécheresse).

Les changements à l'échelle du globe comprennent le réchauffement de la planète, l'affaiblissement de la couche d'ozone, la déforestation et le transport à grande distance de polluants atmosphériques.

I.1.7.1. Les causes naturelles susceptibles d'affecter le climat:

Les variations de l'activité solaire, une cause directe de variation climatique, pourrait être expliquée par la variabilité de l'émission solaire. On a montré, il y a quatre milliards et demi d'années, au moment où naissait le système planétaire, que l'énergie émise par le soleil était environ les 3/4 de sa valeur actuelle. [Gilliland, 1989]. En plus de ce facteur astronomique précité, le climat d'un lieu comme nous l'avons déjà mentionné, dépend également de facteurs géographiques comme la latitude, l'éloignement à la mer et l'altitude; l'évolution de ces facteurs étant elle-même liée à la tectonique des plaques (dérive des continents, mouvement des

pôles et expansion des fonds océaniques). [Ruddiman et Raymo, 1988 ; Kutzbach et al., 1989].

On peut aussi citer le rôle important que joue la masse océanique dans les interactions océan-atmosphère et qui explique certains phénomènes tels qu'ENSO, et ONA. Les éruptions volcaniques importantes (Tambora 1815 ; Krakatoa 1883) sont capables d'injecter dans la base stratosphère d'énormes quantités de poussière, de cendre, de pierres et de vapeur d'eau qui peuvent séjourner pendant plusieurs années ; le voile de poussière ainsi formé peut provoquer une décroissance de la température moyenne au sol et une augmentation en altitude. En effet, selon plusieurs spécialistes, le climat du quaternaire, ère des glaciers, serait expliqué par une épaisse couche d'aérosols et de poussière qui a enveloppé le globe.

I.1.7.2. Les causes artificielles:

Le facteur qui reste le plus préoccupant aujourd'hui est l'influence de l'homme sur le climat, qui tient sa place dans les débats continus sur l'actuel changement climatique survenu sur plusieurs points du globe.

I.1.7.2.1. Effet de serre:

Ce phénomène est provoqué par la progression des émissions de gaz issus d'activités humaines: on peut citer

- le gaz carbonique (CO_2), provenant de la combustion du pétrole et du charbon qui constituent actuellement plus de 65 % des sources d'énergie auxquelles les humains ont recours.
- le méthane (CH_4), issu essentiellement des activités agricoles.

La terre absorbe environ 50 % de l'énergie que lui envoie le soleil. Cette énergie permet à notre planète de se réchauffer. L'atmosphère se présente alors comme un "couvercle" constitué de vapeur d'eau et de gaz. Couvercle indispensable qui agit un peu comme une serre agricole ; sans cet effet de serre, la température moyenne de notre planète descendrait à -18°C , mais les gaz issus des activités de l'homme viennent renforcer et faire grossir cette couverture naturelle. Ce qui résulte en une augmentation de la chaleur. C'est probablement l'homme par ses activités industrielles de plus en plus importantes qui accentue le réchauffement de la terre.

I.1.8. Quelques scénarios envisagés dans cet axe:

Le groupe de travail de l'IPCC [programme intergouvernemental sur les changements climatiques] sur l'évaluation des incidences éventuelles du changement climatique a envisagé des scénarios présentant en général les caractéristiques suivantes :

- Un doublement de la concentration atmosphérique de CO_2 d'ici 2025 à 2050.

- Une augmentation concomitante de la température moyenne mondiale de l'ordre de 1.5 °C à 4.5 °C correspondant au doublement réel du CO₂.

- Une élévation du niveau de la mer d'environ 0.3 à 0.5 m d'ici 2050 et d'environ 1m d'ici 2100, accompagnée d'un réchauffement de la couche superficielle de l'océan variant de 0.2°C à 2.5 °C.

I.1.9. Les conséquences du réchauffement :

- Perturbation du régime des pluies: les précipitations risquent d'être plus abondantes sur l'hémisphère Nord avec des inondations et des tempêtes (ouragans, tornades...).

- Des sécheresses plus fréquentes: notamment dans l'hémisphère Sud. Les zones arides et semi arides semblent être les plus vulnérables.

- Hausse du niveau de la mer par dilatation thermique et fonte des glaciers : cette élévation du niveau des océans pourrait atteindre 1 mètre par endroit. Des zones littorales, certains deltas de fleuves, des îles pourraient être purement et simplement recouverts. Rappelons que 50 % des humains vivent près de la mer.

- Modification des écosystèmes et de la végétation. Les conséquences risquent d'être beaucoup plus importantes pour les pays pauvres que les pays industrialisés. Ces derniers mobiliseront plus facilement les moyens financiers, technologiques et matériels pour s'adapter aux changements climatiques annoncés. Les prévisions faites par GIEC (groupe inter gouvernemental d'évaluation des changements climatiques) ont affirmé que l'Afrique, est sans doute le continent le plus vulnérable, notamment à cause de la pauvreté généralisée qui y règne, le déficit en eau persistant, et la désertification déjà très avancée. [L. Ribadeau; 1997].

I.1.10. Impact du changement climatique sur l'agriculture :

Les évaluations des impacts du réchauffement global sur l'agriculture ont été établies à partir de scénarios climatiques fondés sur des simulations effectuées à l'aide de modèles de circulation générale (MCG).

On retrouve parmi les changements climatiques qui peuvent influencer le plus sur l'agriculture de nouveaux extrêmes climatiques, et la réduction de l'eau du sol disponible.

I.1.10.1. Extrêmes climatiques :

Une augmentation des températures moyennes mensuelles ou annuelles se traduirait par une augmentation du nombre de jours dont les températures dépasseraient certains seuils critiques. Il est sûr que les précipitations connaîtront une modification de leur fréquence ou de leur distribution, mais les températures élevées conjuguées à la sécheresse constituent le plus grand danger du changement climatique global pour l'agriculture dans de nombreuses régions.

I.1.10.2. Réduction de l'eau du sol disponible :

Les plus grands effets pour l'agriculture seraient probablement attribuables à l'accroissement possible de l'évapotranspiration causé en grande partie par l'élévation de la température de l'air et de la surface terrestre. A l'heure actuelle, on peut décrire avec certitude la tendance régionale des changements possibles dans l'eau du sol, en ce basant sur les modèles de prédictions (MCG) qui indiquent tous une diminution de l'eau du sol [Kellogg et Zhao ,1988 ; Schlesinger et Mitchell, 1985 ; Zhao et Kellogg, 1988].

I.2. La sécheresse :**I.2.1. Définition de la sécheresse :**

Il n'existe aucune définition universelle de la sécheresse. Elle pourrait être définie comme une période prolongée de précipitations insuffisantes sur une ou plusieurs saisons qui causent un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays.

La sécheresse est aussi définie selon les différents secteurs qui interagissent avec ses effets. On définit donc une sécheresse du point de vue météorologique, hydrologique, agricole ou socioéconomique.

I.2.1.1. En agriculture:

La sécheresse agricole est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduit significativement les productions agricoles par rapport à la normale ou les valeurs attendues pour une région de grande étendue [Andrew, B et Johanne B ,96].

I.2.1.2. En 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.

I.2.1.3. En hydrologie :

La sécheresse survient suite à la diminution prolongée des apports pluviométriques au niveau des bassins versants. Un déficit d'écoulement en résulte systématiquement au niveau des cours d'eau.

La recharge des nappes souterraines est réduite et les opérations d'irrigation sont compromises. [A. Mokssit, 1996].

On distingue schématiquement plusieurs types de sécheresse :

Les sécheresses dites exceptionnelles qui se traduisent par un déficit pluviométrique important, affectant une vaste région pendant un temps pouvant atteindre plusieurs années consécutives. C'était le cas des sécheresses des années 1913-1915 et 1940-1949 au Sahel.

Les sécheresses que l'on pourrait appeler "méditerranéennes" sont liées aux irrégularités du climat méditerranéen. Elles peuvent compromettre les récoltes d'une saison sans qu'il y ait

pour autant un déficit global annuel important. En effet pour les céréales, les pluies de printemps, qui correspondent à la phase maturité des céréales jouent un grand rôle dans la valeur du rendement.

I.2.2. Les indices de la sécheresse :

Vu la complexité du phénomène il est difficile de faire une analyse exhaustive de la sécheresse dans toutes ses composantes. Beaucoup d'auteurs se sont penchés sur la possibilité de mettre au point des indices permettant d'identifier la sécheresse et mettre en évidence les fluctuations temporelles des précipitations.

I.2.3. Les causes de la sécheresse :

On sait que la formation des précipitations nécessite la présence de plusieurs conditions comme la vapeur d'eau (humidité), les noyaux de condensation et un système de circulation qui permet et favorise la condensation et donc la formation de nuages et des précipitations. En général, la sécheresse se produit en l'absence de l'une de ces conditions. Mais, il existe des détails qui ne sont pas toujours loin de ces conditions. Pour cela, il y a plusieurs travaux et études qui sont faites, elles concernent différentes régions du monde.

Dr Lamb dans sa recherche sur les causes possibles de l'occurrence de la sécheresse au Maroc entre 1979 et 1980, et qui a affecté en réalité une large partie du bassin occidental de la Méditerranée, a identifié des corrélations acceptables entre l'indice de l'ONA et celui des précipitations.

Une autre étude menée par Nicholls (1985) a donné une relation entre le phénomène ENSO et la sécheresse en Afrique sahélienne. Pour l'Algérie, les travaux antérieurs (Matari et al, 1995) ont montré que la sécheresse qui est observée durant les vingt dernières années particulièrement dans la région Ouest est également influencée par le phénomène ENSO. Durant cette période le phénomène EL NINO a été plus fréquent que par le passé, il a été observé plus de 5 fois depuis le début de la décennie 70.

Budyko, (1977) a répertorié l'influence de l'homme au cours de son activité industrielle et agricole. Cette influence de l'homme sur la couverture végétale peut changer les propriétés du sol (humidité du sol, rugosité...), par suite de l'extension des surfaces irriguées qui évolue avec l'accroissement de la population, le bilan hydrologique soit modifié. A ceci on peut ajouter le changement d'albédo dû à l'activité agricole.

Après avoir cité quelques exemples d'étude, on peut définir maintenant quelques termes utilisés par certains auteurs.

I.2.3.1. Le phénomène ENSO :

Le sigle ENSO signifie « el Niño-Southern Oscillation ». El niño est une anomalie climatique qui se produit tous les trois à quatre ans dans l'océan pacifique et qui peut s'accompagner de violentes perturbations météorologiques. L'oscillation australe « Southern Oscillation » est une bascule de pression équatoriale entre le pacifique ouest et le pacifique central « la pression est normalement très élevée dans le pacifique central que dans le pacifique ouest, mais cette différence s'inverse certaines années.

Le terme el niño signifie «le petit garçon» qui fait référence à l'enfant jésus, à cause de son apparition autour de Noël ; il est observé depuis plus d'un siècle par les pêcheurs Sud-Américains qui ont remarqué l'apparition d'eaux chaudes dans l'Est du pacifique le long de la cote de l'équateur et du Pérou. Ce phénomène océanographique présente une accumulation d'eaux chaudes qui se déplace de l'Australie occidentale vers les côtes du Pérou.

Les eaux chaudes ont pour effet un dégagement de chaleur et d'humidité d'où des tempêtes et des précipitations torrentielles plus fréquentes sur ces pays normalement arides (Pérou...). La phase inverse du phénomène el Nino est appelée la Nina. Cette dernière est caractérisée par une masse d'eau plus froide que d'habitude apparaît au large de l'Amérique du Sud, ceci a comme conséquence les sécheresses en Amérique de Sud et des précipitations diluviennes, même des inondations en Australie.

D'après plusieurs chercheurs les effets d'El Nino peuvent se répercuter sur n'importe quelle région du globe. Le déplacement des eaux chaudes du pacifique Ouest (Australie Indonésie) vers le pacifique Est, entraîne d'importantes modifications dans la répartition des pluies sur ces régions du monde. C'est ainsi que l'Indonésie, l'Australie et l'Inde doivent une ou deux fois par décennie faire face à de cruelles sécheresses. Pendant ce temps les côtes du Pérou, du Chili, de la Bolivie et du Brésil se trouvent sous des pluies lourdes et même des inondations.

I.2.3.2. L'Oscillation Nord Atlantique (ONA):

L'oscillation nord-atlantique (ou North Atlantic Oscillation en anglais, d'où le sigle NAO), c'est un phénomène atmosphérique et océanique, qui concerne principalement l'Atlantique Nord. On parle d'oscillation parce qu'il y a un va-et-vient dans la direction Nord-Sud, d'air entre les régions de Ponta Dalgada (Açores) et Akureyri (Islande). Ce va-et-vient de masse a pour conséquences :

Des changements de la pression au sol, donc de l'intensité et de la position de l'anticyclone des Açores et des dépressions d'Islande. De cette façon quand la pression est plus élevée dans la ceinture subtropicale, elle est moins élevée au pôle, et réciproquement (phénomène de balançoire) ;

Des variations des vents d'Ouest moyens ;

Des influences sur le climat (températures, précipitations) tout autour du bassin Atlantique, et tout particulièrement sur l'Europe.

I.2.4. L'impact de la sécheresse:

La sécheresse a de profonds retentissements. Elle affecte nos vies en exerçant des contraintes sur l'approvisionnement en eau en dégradant l'environnement et la santé humaine par la mauvaise qualité de l'eau, en intensifiant l'érosion du sol et en portant préjudice à l'économie du fait de la réduction de la capacité de production agricole.

I.2.4.1. Problème d'approvisionnement en eau :

En période de sécheresse, la demande en eau tend à augmenter. L'approvisionnement hydrique à usage domestique se pose en termes de quantité et de qualité.

D'après les statistiques de 1994-1995, la ressource en eau mobilisable en Algérie est de 14.43 Km³/an. Cette valeur est inférieure à la normale si on considère la capacité de mobilisation des ressources en eau pour la majorité des pays de la méditerranée qui ont une population légèrement supérieure, et même inférieure que celle de l'Algérie. Cette situation a entraîné des restrictions et des coupures dans l'approvisionnement en eau potable, dans de nombreux noyaux urbains surtout les grandes villes comme Oran et Alger. Ces restrictions sont devenues de plus en plus sévères suite à la persistance de la sécheresse des deux dernières décennies.

I.2.4.2. La surexploitation des aquifères :

En Algérie, la demande en eau et la sécheresse associées ont causé une diminution de la ressource en eau souterraine. La pénurie de ressources hydriques superficielles a entraîné, pendant les dernières années, une exploitation intensive des nappes souterraines surtout à usage agricole, ce qui a produit de fortes baisses de niveaux phréatiques.

I.2.4.3. Effets sur le sol :

Une sécheresse prolongée a des répercussions néfastes sur les sols. Le dessèchement de la réserve hydrique donne lieu à l'accentuation de l'érosion éolienne qui engendre la perte de la fertilisation des sols.

Le dessèchement des sols s'accompagne aussi par des phénomènes de salinisation de la couche arable par effet de remontée capillaire. Les sels déposés détruisent la structure des sols. Ces aspects ne sont pas négligeables dans les sols Algériens.

I.2.4.4. Impact sur le secteur agricole et l'élevage :

L'agriculture est une activité humaine extrêmement sensible aux aléas du climat.

Des phénomènes climatiques extrêmes tels que les gels hâtifs et tardifs, les pluies excessives et les inondations représentent une sérieuse menace pour la production agricole.

Cependant, aucun phénomène n'a été plus dévastateur à grande échelle que la sécheresse en Algérie, qui entraîne des pertes directes sur la production agricole.

Outre la réduction des rendements, les sécheresses prolongées entraînent une multitude d'autres effets comme, la réduction de la pâture et le tarissement des points d'eau d'abreuvement du cheptel.

Les conditions de sous alimentation du cheptel accentue sa mortalité surtout s'il est mal structuré.

I.2.4.5. Impact sur la santé humaine:

En réduisant les productions agricoles et animales et donc le taux de couverture des besoins nutritionnels de l'homme, la sécheresse provoque une sous-alimentation qui est la cause d'une faible résistance aux maladies, et d'une mortalité importante notamment chez les enfants et les personnes âgées; par exemple on estime qu'en Inde les famines dues à la sécheresse ont provoqué 1.5 millions de morts. En relation avec l'évolution de la population et la pénurie de la ressource en eau, les maladies à transmission hydriques deviennent un risque majeur.

I.2.5. La sécheresse en Algérie :

L'Algérie qui fait partie des pays de la rive Sud méditerranéenne, n'a pas échappé à ce changement climatique global. La position géographique de l'Algérie offre une mosaïque de climats de type méditerranéen soumis aux influences maritimes au Nord, et sahariennes au Sud. Cette mosaïque est peu généreuse en eau, avec une dégradation de la pluviométrie vers le Sud, du couvert végétal et des sols, et un passage progressif au désert. Ainsi, une grande variabilité spatio-temporelle caractérise les précipitations, avec des quantités de pluies qui dépassent 1500 mm à l'extrême Nord jusqu'à moins de 60 mm à l'extrême Sud. Cette situation climatique vulnérable a généré de nombreuses recherches sur le climat de l'Algérie et plus particulièrement sur la pluviométrie (Djellouli et Daget, (1993) ; Demmak et al, (1994) ; Matari et al, 1995 ; Kadi, 1995).

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). Ces dernières décennies, la sécheresse s'est imposée avec force en tant qu'élément structurel du climat de l'Algérie.

L'augmentation significative dans la fréquence des sécheresses, de leur sévérité et de leur champ de couverture spatiale, s'accompagne d'une évapotranspiration intense et d'un réchauffement important lié au changement de la circulation générale. Ceci, a rendu ces dernières années sèches et de plus en plus difficiles pour différents secteurs socioéconomiques du pays.

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 et à 107 % au Maroc.

Les variations spatiales et temporelles enregistrées par les précipitations, influencent surement, les différents aspects de l'activité humaine, impactant ainsi, la vie socioéconomique, surtout sur l'agriculture, les industries, les transports, et les potentialités touristiques.

L'Algérie est caractérisée par un climat très diversifié selon les régions. En effet, les zones littorales bénéficient d'un climat tempéré, alors que le climat est désertique dans le Sud du pays. Ainsi, il présente d'importantes nuances : méditerranéen au Nord, continental à l'intérieur des terres et saharien au Sud. La moyenne des pluies annuelles décroît du Nord au Sud et d'Est en Ouest. La saison des pluies est relativement longue, elle dure au moins 7 mois (de Septembre-Octobre à Avril-Mai).

L'irrégularité climatique est un fait caractéristique du climat méditerranéen. Ce dernier se définit par l'existence d'une période estivale sèche et chaude qui soumet la végétation à d'important stress hydrique (Quezel et Médail, 2003). Daget (1977) a proposé une approche explicitement bioclimatique pour définir ce qu'on appelle l'enveloppe climatique méditerranéenne (ECM). Il s'inspire essentiellement des travaux d'Emberger (1941) et de Bagnouls et Gaussen (1953). Sa définition bioclimatique est aujourd'hui reconnue par la communauté scientifique travaillant sur le bassin méditerranéen. Ainsi, pour définir et délimiter le climat méditerranéen, Daget (1977) a proposé deux critères :

i) l'été doit être la saison la moins arrosée,

ii) la valeur de l'indice de sécheresse estivale doit être inférieur à 5 avec $(S=Pe/M)$ où Pe est le cumul pluviométrique de l'été et M est la température du mois le plus chaud.

I.3 Les précipitations en Algérie

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

Les cartes pluviométriques de l'Algérie (Seltzer P., 1946 ; Gaussen H., 1948 ; Chaumont M. et Paquin C., 1971 ; A.N.R.H., 1993) retracent toutes cet ordonnancement des précipitations.

La dernière carte en date (ANRH) permet de faire ressortir des zones de fortes précipitations (supérieures à 900 mm) dans la zone montagneuse Nord-Est, allant de Bejaia à Collo, ainsi que dans les tranches d'altitude les plus élevées des Monts de la Medjerda et du massif de l'Edough dans le Nord-Est. La pluie atteint plus de 1400 mm sur les hauteurs d'Erraguène et jusqu'à 1800 mm sur le massif de Collo, avec 1689 mm à la station de Zitouna. Les isohyètes de 600 à 800 mm balayent tout le reste de l'Atlas tellien avec cependant des contrées beaucoup plus pluvieuses dans la région extrême Est (El Kala).

Les Hautes Plaines sont nettement cernées dans leur bordure Nord par l'isohyète 500 mm. La pluviométrie décroît vers la bordure Sud (350 mm) avec des creux assez nets (moins de 300 voire moins de 200 mm) dans la zone des lacs salés. C'est le même creux que l'on observe sur la cuvette du Chott Hodna, traversée par les isohyètes 300 et 250 mm.

L'Atlas saharien, en raison de l'effet orographique et l'exposition du versant Nord, enregistre une remontée du total pluviométrique vers des valeurs de 400 à 600 mm par an ; les sommets de l'Aurès pouvant recevoir plus de 600 mm. L'isohyète 300 mm marque l'amorce de la décroissance des précipitations sur le piémont Sud de l'Atlas dont la bordure méridionale est jalonnée par l'isohyète 200 mm et même 150 mm.

Deux groupes de facteurs, géographiques (éloignement par rapport à la mer, altitude, exposition des versants par rapport aux vents pluvieux du Nord-Ouest) et météorologiques (déplacement des masses d'air polaire océanique, froid et humide, des masses d'air tropical chaud et humide de l'Atlantique Sud et enfin des masses d'air tropical continental ou anticyclone saharien) influencent la répartition spatiale des précipitations mais aussi les structures des régimes pluviométriques (Chaumont M. et Paquin C., 1971).

Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat algérien. La carte de l'A.N.R.H. montre que les moyennes pluviométriques sont inférieures d'environ 10% à celles de la série de Chaumont M. et Paquin C., ces deux auteurs ayant eux-mêmes constaté une diminution des précipitations par rapport à celles cartographiées par Seltzer P.

La comparaison d'une série récente (1971-95) avec celle étudiée par Seltzer P. (1913-38) a permis de constater que sur 47 stations d'Algérie ayant des séries communes aux deux périodes, 42 ont vu leur moyenne diminuer, à raison d'un taux moyen de l'ordre de - 20 %.

S'agissant de stations situées dans l'Est, le taux moyen de décroissance entre les deux périodes 1931-55 et 1971-95 se situe autour de - 16 % (El Kala : - 29,2 %, Souk Ahras : - 19,1 %, Biskra : - 18 %, Msila : - 13,8 %, Batna : - 7,3 %) (Anser A., 1998).

Par ailleurs, d'anciens travaux climatologiques ont tenté de décrire et d'expliquer les régimes pluviométriques différenciés de l'Algérie (Queney P., 1937 ; Seltzer P., 1946 ; Isnard I., 1950 ; Delannoy, 1958).

La distinction est généralement établie entre deux principaux régimes : méditerranéen sur le littoral jusqu'aux chaînes du Tell (précipitations d'origine cyclonique qui tombent principalement en hiver, décembre et février, fournissant plus de la moitié des précipitations annuelles totales) et subtropical, localisé essentiellement au Sud.

Les régions affectées du même régime présentent une disposition en zones parallèles à la côte. Outre la concentration des pluies sur un nombre réduit de jours par an, le régime est caractérisé par un minimum d'été (juillet-août) accentué partout alors que le maximum moyen mensuel, déjà variable en quantité, ne se situe pas au même mois partout.

La zone littorale et sub-littorale se caractérise par un régime monomodal (le mois le plus arrosé est placé au cœur de l'hiver, décembre ou janvier). Elle lui succède une zone de transition (un maximum principal en hiver et un maximum secondaire au printemps). Enfin, la zone intérieure (les Hautes Plaines en particulier) se singularise par un régime bimodal (un premier maximum en automne-hiver et un second maximum au printemps).

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 considérant les stations du Nord A. 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), ont constaté 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 sécheresses sévères et généralisées durant des années très isolées : 1937, 1961, 1970.

Matari et Douguédroit (1993) appliquent 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.

Une étude effectuée sur l'évolution pluviométrique (Kadi, 1995) par rapport à l'indice de normalité sur quelques pays méditerranéens (Italie, Algérie, France, Grèce, Espagne, Maroc, Portugal et Moyen-Orient) a montré que :

1. L'occurrence du déficit en précipitations dans une très vaste zone durant les années 1944, 1945, 1970, 1973, 1980, 1981, 1989 et 1990, où au moins entre 4 et 6 des huit sous régions traitées ont été touchés;

2. Certaines zones sont plus affectées que d'autres : l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale; la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale;

3. Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

Les résultats des études effectuées par Djellouli et Daget, (1993) ont montré que depuis 1881, l'Algérie a subi deux périodes de sécheresse : la pénurie a été ressentie de 1943 à 1948 qui avait une répercussion importante sur la récolte et le bétail, et la deuxième est celle que nous subissons depuis 1980. Durant les décennies 1980, 1990 le déficit pluviométrique a été estimé à 50 % pour les régions du Centre et de l'Ouest de l'Algérie, à l'Est; il était de 30 % et l'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie (Ait Mouhoub et al, 2002).

Meddi et Humbert (2000), à partir d'une étude sur la sécheresse ont 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...).

Cette synthèse bibliographique montre l'importance du phénomène étudié et combien la communauté scientifique s'intéresse à la sécheresse, principalement aux indicateurs de sécheresse comme éléments essentiels pour la gestion de la pénurie d'eau. Les risques de sécheresse ainsi que la préparation et l'élaboration des plans d'intervention pour la réduction des impacts potentiels de la sécheresse ont retenu l'attention de plusieurs chercheurs.

Dans ce cadre, ce travail présente les principales caractéristiques du régime pluvial sur le littoral Algérien ; l'évolution spatiale et temporelle des précipitations moyennes annuelles, une étude par les tests de tendance et de rupture et enfin une évaluation de la persistance de la sécheresse par les chaînes de Markov.

Chapitre II

Collecte et critique des données

II.1 Introduction

L'analyse des données disponibles est en général le premier pas à franchir dans l'étude d'un phénomène hydrométéorologique (précipitations, températures, débit...)

Les données hydrologiques constituent, la plupart du temps, le seul outil dont dispose l'hydrologue pour étudier et comprendre le comportement d'un phénomène hydrométéorologique, ou prendre des décisions relatives à un projet particulier concernant ce domaine.

Il est donc de première importance de connaître à fond les techniques nécessaires à l'analyse et à la critique des données afin de tirer le maximum d'informations de l'échantillon à analyser, d'évaluer la qualité des conclusions qu'on en tire et de quantifier le risque que comporte une génération à partir des données partielles.

Il d'agit d'abord de combler les lacunes des données manquantes, de détecter et de relever les valeurs aberrantes (singulières ou douteuses), et aussi de vérifier l'indépendance et l'homogénéité temporelles des séries de données étudiées nécessaire à toute étude statistique.

II.2 Inventaire des données disponibles

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude proviennent de la base de données de l'Office National de la Météorologie (O.N.M) de Dar El Beida. Elles concernent dix-huit stations représentatives de différents régimes pluviométriques du Nord de l'Algérie (Figure. II.1). Ces données sont de qualité et de durées variables, et sont au pas de temps mensuel.



Figure II.1.a : Localisation des postes pluviométriques recueillis

Les caractéristiques synoptiques de ces stations sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Présentation des stations étudiées

Station	Numéro de la station	Code	Latitude (Nord)	Longitude (E/W)	Altitude (Mètre)	Période d'Observations
Alger	6	390	36°43	03°15 E	24	1970-2014
Arzew	4	452	35°49	00°16 W	03	1970-2013
Oran	3	490	35°38	00°36 W	90	1970-2014
Tlemcen	2	531	35°01	01°27 W	210	1970-2013
Skikda	9	355	36°53	06°54 E	01	1970-2014
Bejaia	7	402	36°43	05°04 E	02	1970-2014
Mostaganem	5	457	35°53	00°07 E	137	1970-2014
Annaba	10	360	36°50	07°49 E	14	1970-2014
Jijel	8	351	36°48	05°53 E	08	1970-2014
Ghazaouet	1	571	35°03	01°53 W	03	1970-2014
El Kala	11	361	36°54	08°27 E	11	1970-2000
Ténès	12	410	36°30	01°20 E	17	1981-2013
Maghnia	13	/	34°51	01°43 W	310	1980-2013
Chlef	14	/	36°10	01°20 E	390	1980-2013
Meliana	15	/	36°17	02°13 E	420	1980-2013
Benisaf	16	/	35°18	01°23 W	07	1980-2013
Constantine	17	/	36°17	06°37 E	694	1980-2014
Borj.B.A	18	/	36°04	04°46 E	928	1981-2013

II.2.1 Critères de sélection des stations

Lors d'une telle étude, les séries pluviométriques peuvent ne pas être du même degré de fiabilité, pour cela il est préconisé d'établir certaines règles et critères pour pouvoir trancher entre les séries à garder et celles à éliminer.

Trois critères majeurs s'imposent lors de cette sélection préliminaire des données recueillies :

- La taille de l'échantillon.
- La concomitance des séries de données.
- La qualité des données (faiblesse des lacunes dans les séries observées).

II.2.2 Stations retenues après sélection préliminaire

Sur la base de ces critères, dix stations pluviométriques ont été retenues comme stations de référence pour cette étude (**Tableau II.2**).

Nous avons éliminé les stations de :

- Ténès, Béni Saf, Maghnia et Chlef à cause de l'importance des lacunes qu'elles contiennent.
- El Kala qui n'est plus en service depuis l'année 2000.
- Constantine, Bordj Bou Arreridj et Miliana pour leur taille réduite.

Le **tableau II.2** dresse la liste des stations recueillies. L'inventaire des données manquantes par mois et par station pluviométrique est donné sur la **figure II.2**. Cinq stations sur dix comportent des lacunes, comprises entre 0 et 10.5 % (nous entendons par lacune un mois sans mesure disponible).

Tableau II.2 : Stations retenues après sélection

Station	Période	Nombre de mois manquants	% de mois manquants
Ghazaouet	1970-2014	0	0
Tlemcen	1970-2013	12	2.2
Oran	1970-2014	0	0
Arzew	1970-2013	57	10.5
Mostaganem	1970-2014	9	1.6
Alger	1970-2014	0	0
Bejaia	1970-2014	0	0
Jijel	1970-2014	1	0.2
Skikda	1970-2014	10	2.2
Annaba	1970-2014	0	0



Figure II.1.b : Localisation des postes pluviométriques retenus

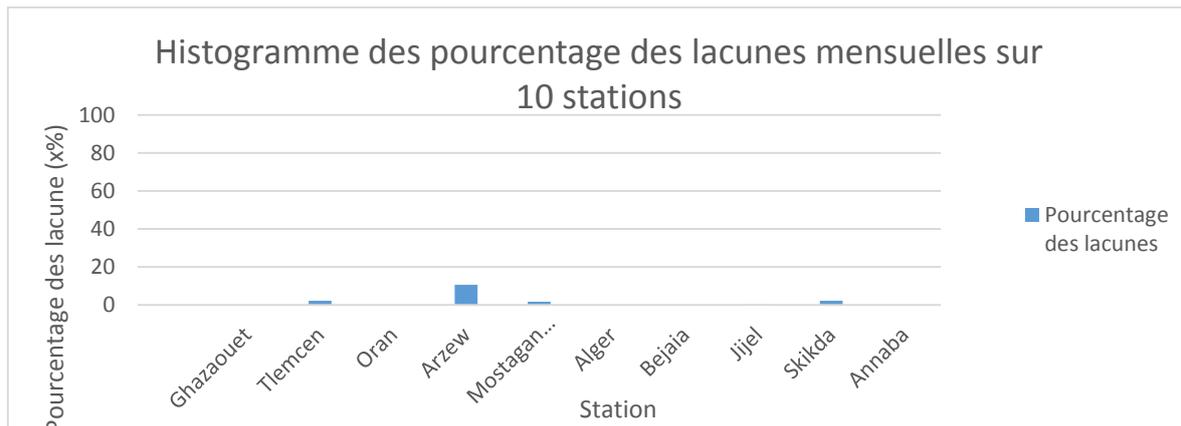


Figure II.2.a : Pourcentage des lacunes dans les données pour chaque station à l'échelle mensuelle (1970-2014)

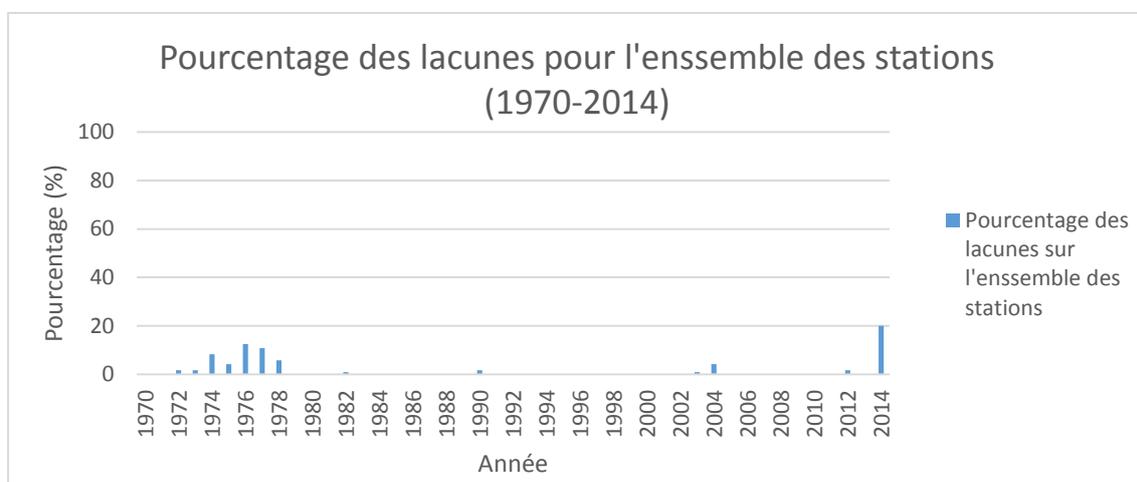


Figure II.2.b : Pourcentage des lacunes sur l'ensemble des stations (1970-2014)

II.3 Critiques des données

II.3.1 Introduction

Les données pluviométriques proviennent d'une mesure qui a été recueillie soit par :

- Une lecture directe des paramètres (à partir d'un pluviomètre) ;
- Un dépouillement d'enregistrement (à partir de pluviogrammes).

Toutes ces mesures peuvent comporter deux types d'erreurs ; les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles.

- Les erreurs systématiques peuvent être dues à un mauvais réglage de l'instrumentation de mesure, à une procédure de mesure incorrecte, ou à l'installation inadéquate d'appareillages de mesure, donc à des causes produisant des effets constants ou légèrement variables dans le temps.

- Les erreurs accidentelles surviennent inopinément, et ne peuvent être prévues ni évitées, Elles peuvent être dues à une erreur de manipulation ou à une défectuosité imprévue de l'instrumentation, donc à des causes soudaines qui introduisent des déviations sensibles au sein de la série de données.

En effet, ces erreurs de manipulation peuvent altérer les séries, et si certaines précautions ne sont pas prises durant cette phase de transcription de données, celles-ci peuvent devenir inutilisables à cause du cumul d'irrégularités.

Afin de garantir la qualité des données, on doit suivre les étapes suivantes :

- Détecter et corriger les erreurs ;
- Compléter les données manquantes dans les séries d'observations ;
- Vérifier la permanence des données dans le temps.

II.3.2 Méthodes de comblement de lacunes

Dans la pratique courante, de nombreuses causes concourent pour entraîner l'absence de certaines informations : absences de mesure, défaut de transmission, erreur de stockage, manipulation erronée, etc. Cela fait que dans les fichiers disponibles certaines données sont manquantes.

Ce paragraphe décrit les méthodes de comblement de lacunes pour les valeurs mensuelles.

Le comblement des données manquantes peut se faire soit par :

- Le calcul de la moyenne mensuelle interannuelle ;
- La régression Linéaire ;
- La simulation.

II.3.2.1 Calcul de la moyenne mensuelle interannuelle

Les données mensuelles se présentent sous forme d'une matrice à n lignes représentant les années et p colonnes représentant les mois, malheureusement cette matrice peut contenir des vides correspondant aux lacunes d'observations.

Lorsqu'un fichier d'observations comporte peu de valeurs manquantes, le comblement de ces lacunes par la méthode de la moyenne mensuelle interannuelle est approprié.

$$[X]= \begin{array}{c|cccccc} X(1,1) & \text{Inconnu} & \dots & X(1,j) & \dots & X(1,p) \\ X(2,1) & X(2,2) & \dots & X(2,j) & \dots & \text{Inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Inconnu} & \dots & \dots & \dots & \dots & \text{Inconnu} \\ X(i,1) & X(i,2) & \dots & X(i,j) & \dots & X(i,p) \\ \dots & \text{Inconnu} & \dots & \text{Inconnu} & \dots & \dots \\ X(n,1) & X(n,2) & \dots & X(n,j) & \dots & X(n,p) \end{array}$$

Le nombre d'observations et de $(n \times p)$, le comblement des valeurs manquantes se fait en remplaçant la valeur manquante par la moyenne mensuelle interannuelle, telle que :

$$M_j = 1/q_j \sum_{i=1}^p X(i,j)$$

Avec :

$$q_j = n - (\text{nombre d'inconnues de la colonne } j)$$

II.3.2.2 Méthode de la régression linéaire simple

Soient X et Y deux échantillons, avec n observations x_1, x_2, \dots, x_n , et y_1, y_2, \dots, y_n , correspondant à deux mesures simultanées de précipitations sur deux stations différentes.

Si ces deux stations sont assez proches, on peut espérer que les observations soient similaires, et la connaissance d'une des variables permet alors, dans une certaine mesure, la prédiction quantitative ou qualitative de l'autre. Théoriquement, on appelle le modèle de régression linéaire sur les données expérimentales, la méthode des moindres carrés reprenant sur l'échantillon la propriété que $E(y/x) = \alpha + \beta \cdot x$ est la meilleure approximation de y par x en moyenne quadratique. On cherche donc à ajuster au nuage de points $(x_i; y_i)$ une droite d'équation $Y^* = a \cdot x + b$.

Dans la plupart des cas, les observations ne sont pas alignées, ce qui fait que la droite n'est pas bien définie ; il faut donc établir certains critères pour obtenir la droite de régression linéaire optimale tel que :

La somme des carrés des distances de chacun des points à la droite soit la plus petite possible (c'est-à-dire $\sum (y_i - y_i^*)^2$ soit minimale).

La méthode appliquée pour la détermination des paramètres a et b est celle des moindres carrés :

$$\sum (y_i - y_i^*)^2 = \sum (y_i - a - bx_i)^2 = F(a,b)$$

Ce minimum est atteint pour $\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0$ ceci donne les deux équations :

$$\sum (y_i - a - bx_i)^2 = 0 \rightarrow \bar{y} = a + b\bar{x}$$

Dont la solution est :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = r \frac{S_y}{S_x}$$

D'où
$$y^* = \bar{y} + r \frac{S_y}{S_x(x - \bar{x})}$$

II.3.2.3 Simulation à partir de la fonction de répartition

Pour simuler des grandeurs mesurant des phénomènes naturels tels que la pluie ou le débit, il ne faut pas perdre de vue que cette notion est basée essentiellement sur le concept du hasard.

C'est une méthode de tirage d'un échantillon artificiel de (n) valeurs d'une variable aléatoire continue, elle s'applique lorsque F^{-1} a une forme analytique simple. Soit $F(x)$ la fonction de répartition de x , la variable $Y = F(x)$ est distribuée sur $[0 ; 1]$ en effet :

$$g(y) = \frac{f[F^{-1}(y)]}{f[F^{-1}(y)]}$$

Si on tire (n) nombres uniformément répartis entre $[0 ; 1]$: $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ l'échantillon cherché $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ sera déterminé par $x_i = F^{-1}(r_i)$; cette méthode est dite « de l'anamorphose » (**Figure II.3**). On dit que l'on a simulé la variable X .

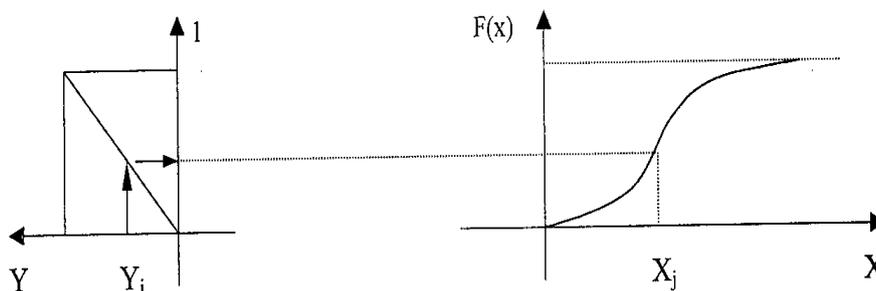


Figure II.3 : Simulation à partir de la fonction de répartition

II.3.3 Comblement de lacune

II.3.3.1 Comblement par la moyenne Mensuelle Interannuelle

Les stations de Mostaganem, Skikda, Jijel et Tlemcen ne présentant pas beaucoup de valeurs manquantes, leurs lacunes ont été comblées avec la moyenne mensuelle interannuelle, le **tableau II.3** indique l'emplacement et le remplacement des lacunes par cette technique pour les quatre stations précitées.

Tableau II.3 : Comblement par la moyenne mensuelle interannuelle

Station	A\M	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Mosta	1975								0				
	1977		46..8										
	1978							0		19.4	30.6	62.1	60.7
	1990		46.8	37.6									
Skikda	1976					35.2	11	3	10.8				
	2003											123.3	
	2004	108.2	96.4	78.3	62	35.2							
Jijel	1982									101.8			
Tlemcen	2014	47.7	51.4	61.06	45.8	35	6.4	0	0	17.2	28.5	46.9	43.7

Le tableau ci-dessous donne le coefficient de détermination R^2 pour chaque station avant et après comblement par la méthode de la moyenne mensuelle interannuelle.

Tableau II.4 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Moyenne Mensuelle Interannuelle)

Station	Mostaganem		Skikda		Jijel		Tlemcen	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Janvier	-	-	0.99	0.99	-	-	0.99	0.98
Février	0.98	0.99	0.99	0.99	-	-	0.97	0.97
Mars	0.99	0.99	0.99	0.99	-	-	0.98	0.99
Avril	-	-	0.99	0.99	-	-	0.98	0.98
Mai	-	-	0.99	0.98	-	-	0.98	0.97
Juin	-	-	0.99	0.98	-	-	0.99	0.97
Juillet	0.96	0.95	0.98	0.97	-	-	0.98	0.99
Aout	0.97	0.97	0.99	0.98	-	-	0.96	0.97
Septembre	0.94	0.95	-	-	-	-	0.99	0.98
Octobre	0.98	0.98	-	-	0.98	0.97	0.97	0.97
Novembre	0.99	0.99	-	-	-	-	0.99	0.99
Décembre	0.99	0.99	0.98	0.99	-	-	0.97	0.98
Tot Annuel	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97

II.3.3.3 Comblement par la régression linéaire

Cette méthode est applicable lorsque le nombre de valeurs manquantes est important.

Elle a été appliquée pour la station d'Arzew, où on a calculé les coefficients de détermination inter-stations (Oran-Arzew) et (Mostaganem-Arzew), puis on a déterminé les équations de régressions linéaires qui correspondent aux coefficients de détermination importants pour chaque mois présentant des lacunes.

Le tableau ci-dessous donne les coefficients de détermination pour chaque mois.

Tableau II.5 : Coefficients de détermination inter-Stations

Station\Mois	Jav	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
ARZ-ORN	0.62	0.7	0.68	0.77	0.2	0.66	0.86	0.49	0.3	0.66	0.66	0.53
ARZ-MOS	0.59	0.72	0.77	0.72	0.11	0.26	0.69	0.58	0.72	0.36	0.47	0.71

Tableau II.6 : Comblement des lacunes mensuelles par la régression linéaire pour la station d'Arzew

An/ Mois	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1972							0	0.5				
1973							0	0				
1974	10	49.1		99.2	0		0	0	0	95.3	10	0
1975	4.3	18	126.3				0					
1976		49.1	5.8	50.7	53	6.4	3.2	9	5.7	58.1	5.5	16.5
1977	82.6	31.9	2	21.8	53.7	0	0.4	0	0	28.5	58	36.6
1978	21.4	0										
2012					0	0						
2014	53.4	49	36.2	0	5	2.2	0	0	46.3	0.2	19.8	55.7

Sur la base du calcul des coefficients de détermination R^2 optimaux (les plus grands), avant et après comblement (**tableau II.7**), on a constaté que les différences sont peu significatives, ce qui donne des équations de régressions linéaires presque homogènes.

Tableau II.7 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Régression Linéaire)

R^2 \mois	Janv	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc.
R^2 (Av)	0.62	0.72	0.77	0.77	0.2	0.66	0.86	0.58	0.72	0.66	0.66	0.71
R^2 (Ap)	0.67	0.74	0.81	0.77	0.26	0.67	0.88	0.61	0.74	0.7	0.67	0.7

D'après les résultats du **tableau II.7**, on note qu'il existe de faibles coefficients de détermination tel que 0.2 et 0.26, pour le mois de Mai, par exemple, on préfère alors utiliser la simulation pour avoir un meilleur comblement de ces lacunes.

II.3.3.3 Comblement par simulation

Le choix des valeurs simulées a été fait, de telle sorte que, l'écart entre les coefficients de détermination, avant et après le comblement, soit insignifiant. Le tableau ci-dessous donne les valeurs obtenues par cette technique.

Tableau II.8 : Comblement de lacunes de la station d'Arzew par simulation

An/ Mois	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1972							0.2	0.4				
1973							3.2	0				
1974	62	0		3.6	13.6		0	8.7	8.4	10	32.7	55.2
1975	59.5	51.9	8.1				0.5					
1976		43	34.4	61.8	39.1	0.1	19.4	3.7	23.3	28.9	43.6	10
1977	46.4	56	73.7	15.4	0.2	0	0.7	0	8	35.5	13.2	48
1978	3.8	34										
2012					18	2.5						
2014	40.2	24	30.7	28.2	18	2.5	0	0	16.7	25.7	47.6	41.6

Les coefficients de détermination R^2 pour chaque mois avant et après comblement par la méthode de la simulation sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.9 : Coefficients de détermination avant et après comblement (Simulation)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
$R^2(Av)$	0.97	0.98	0.98	0.95	0.96	0.97	0.95	0.98	0.97	0.96	0.97	0.95
$R^2(Ap)$	0.96	0.98	0.96	0.96	0.97	0.95	0.94	0.95	0.98	0.96	0.98	0.96

II.3.4 Détection des valeurs singulières

Il arrive fréquemment que des erreurs se glissent dans les données de base et en dénaturent complètement le contenu. Cela peut se produire au cours de la mesure, de la transmission, du codage, du stockage ou du décodage des données d'observations. Il est important donc avant tout traitement de détecter les erreurs grossières de ce genre afin que l'on puisse effectuer une analyse plus fine pour décider si cette donnée douteuse est aberrante et doit être éliminée, ou si c'est une donnée exceptionnelle, qui par conséquent doit être au contraire précieusement conservée.

Le test statistique élaboré par Grubbs et Beck permet de détecter les erreurs douteuses dans les valeurs observées.

II.3.4.1 Présentation du test de Grubbs et Beck

Ce test est très utilisé à cause de sa simplicité. Il peut détecter les points singuliers de la série en calculant la statistique suivante ;

$$X_h = EXP(\bar{X} + K_n * S)$$

$$X_l = EXP(\bar{X} - K_n * S)$$

Tel que :

X_h : la valeur maximale que ne doivent pas dépasser les valeurs de l'échantillon.

X_l : la valeur minimale que ne doivent pas atteindre les valeurs de l'échantillon.

\bar{X} et S : sont respectivement la moyenne et l'écart-type des logarithme népériens des éléments constituant l'échantillon.

K_n : la valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillon et de niveaux de signification.

Avec n : la taille de l'échantillon.

Au niveau de 10% l'approximation polynomiale suivante a été donnée par Bobée (1991) :

$$K_n = -3.62201 + 6.28446 * n^{\frac{1}{4}} - 2.49835 * n^{\frac{1}{2}} + 0.491436 * n^{\frac{3}{4}} - 0.037911 * n$$

Pour $n = 45$ la valeur statistique du test de Grubbs et Beck est :

$$K_n = 9.073832664$$

En appliquant ce test, toutes les valeurs de l'échantillon supérieures à X_h ou inférieures à X_l sont considérées comme valeurs singulières qu'il faut comparer avec d'autres observations des autres stations pour identifier par la suite la cause de la présence de cette valeur singulière.

Le tableau suivant donne les résultats du test de Grubbs et Beck appliqué sur les séries de données des dix stations du littoral Algérien.

Tableau II.10 : Résultats du test de Grubbs et Beck

STA		Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Tot. Ann
ALG	X_h	10 E+5	5 E+6	10 E+5	24 E+6	25 E+6	24 E+7	14 E+7	16 E+7	10 E+6	52677	19 E+4	44911	9769
	X_l	5 E-4	5 E-4	1.7 E-3	6 E-4	1.8 E-5	7 E-7	3 E-8	5 E-8	2.8 E-5	0.042	0.03	0.137	39.8
ANA	X_h	27 E+3	48 E+3	32 E+3	40 E+3	7 E+5	7 E+7	9 E+7	12 E+6	34 E+4	12 E+4	16 E+4	6 E+4	5104
	X_l	0.2	0.08	0.1	0.05	8 E-4	4 E-7	8.8 E-8	9 E-07	0.002	0.02	0.03	0.12	78.9
BEJ	X_h	2 E+5	5 E+7	4 E+6	3 E+5	6 E+7	9 E+7	16 E+6	13 E+6	2 E+7	8 E+6	5 E+6	3 E+5	8071
	X_l	0.02	9 E-3	0.011	0.011	10 E-4	2.7 E-7	1 E-07	1.2 E-7	5 E-4	3 E-3	0.01	0.03	72.6
MOS	X_h	3 E+7	2 E+8	3 E+6	7 E+7	7 E+7	2 E+7	10 E+6	7 E+6	7 E+7	14 E+5	8 E+6	3 E+6	4700
	X_l	3 E-5	3 E-6	2 E-4	8 E-4	2 E-6	9 E-8	10 E-6	4 E-8	9 E-7	2 E-4	2 E-4	5 E-4	28
SKI	X_h	3 E+4	5 E+5	2 E+6	4 E+4	6 E+5	3 E+7	6 E+6	10 E+8	4 E+6	4 E+5	4 E+5	6 E+6	5523
	X_l	0.23	0.01	10 E-3	0.06	9 E-4	8 E-7	9 E-8	8 E-8	2 E-4	8 E-3	0.01	12 E-2	95
ORN	X_h	9 E+6	5 E+6	5 E+6	10 E+8	10 E+8	10 E+8	2 E+5	4 E+6	5 E+7	5 E+5	2 E+6	4 E+6	4383
	X_l	9 E-5	10 E-4	10 E-4	3 E-5	10 E-4	2 E-7	7 E-7	10 E-6	10 E-5	7 E-4	8 E-4	3 E-4	27
JIJ	X_h	2 E+4	5 E+6	2 E+4	4 E+4	3 E+6	10 E+8	10 E+7	10 E+8	3 E+6	5 E+5	5 E+5	8 E+4	6270
	X_l	0.04	10 E-3	0.02	0.1	2 E-4	10 E-6	8 E-8	8 E-8	6 E-4	0.01	0.02	0.22	138
GHA	X_h	2 E+7	5 E+8	7 E+6	10 E+7	10 E+7	10 E+7	2 E+5	3 E+6	3 E+8	3 E+7	2 E+7	4 E+6	6927
	X_l	7 E-5	9 E-7	8 E-5	4 E-5	9 E-6	8 E-8	4 E-7	9 E-8	10 E-7	7 E-6	5 E-5	2 E-4	15
TLE	X_h	4 E+7	9 E+7	10 E+7	3 E+7	4 E+6	10 E+7	8 E+5	2 E+7	2 E+7	8 E+7	5 E+6	10 E+6	9845
	X_l	10 E-5	9 E-6	10 E-3	3 E-4	10 E-4	3 E-7	3 E-7	3 E-8	3 E-6	2 E-6	2 E-4	8 E-4	13
ARZ	X_h	2 E+7	10 E+9	2 E+7	10 E+7	3 E+7	2 E+6	4 E+5	2 E+6	2 E+7	3 E+7	6 E+7	10 E+5	5020
	X_l	3 E-5	2 E-7	10 E-5	2 E-5	3 E-6	4 E-7	2 E-7	6 E-8	10 E-8	6 E-6	10 E-5	10 E-2	14

II.3.4.2 Analyse des résultats

L'application de ce test a détecté les valeurs nulles comme des valeurs singulières, mais nous ne pouvons les rejeter car ils correspondent aux mois secs.

II.4 Traitement statistique des données.

Après le comblement de lacunes des données mensuelles disponibles, il est impératif de vérifier l'indépendance et l'homogénéité de séries pluviométriques retenues.

II.4.1 Test d'indépendance

L'application des méthodes statistiques repose sur la validité de certaines hypothèses de bases relatives à la constitution de l'échantillon observé. En effet le fichier recueilli doit être constitué par des séries d'observations indépendantes formant ce qu'on appelle un échantillon extrait au hasard de la population statistique. En d'autres termes l'échantillon

$X=(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$ est dit « au hasard », si le test permet de vérifier cette hypothèse H_0 d'indépendance des données d'observations.

Dans notre étude nous avons appliqué le test de Wald-Wolfowitz (couramment utilisé) sur les valeurs annuelles.

II.4.1.1 Test de Wald-Wolfowitz

Ce test est basé sur le critère qu'aucune observation appartenant à l'échantillon ne devrait influencer l'observation suivante, Bobée (1991), c'est-à-dire que la valeur enregistrée ne dépend pas de la valeur enregistrée une année avant.

La statistique du test est calculée comme suit :

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i X_{i+1} + X_N X_1$$

Pour N « suffisamment grand », cette statistique suit une distribution normale :

$$N \left(\frac{m_1^2 - m_2}{N-1}, \frac{m_2^2 - m_4}{N-1} + \frac{m_1^4 - 4m_1^2 m_2 + 4m_1 m_3 + m_2^2 - 2m_4}{(N-1)(N-2)} - \left[\frac{m_1^2 - m_2}{N-1} \right]^2 \right)$$

Avec : $m_r = \sum_{i=1}^N x_i^r$

m_r : Moment d'ordre r de l'échantillon étudié.

La valeur statistique $T = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{VAR(R)}}$ suit une distribution normale standardisée $N(0, 1)$, et est utilisée pour tester à un niveau de signification, l'hypothèse d'indépendance en comparant la valeur absolue de T avec la valeur normale standard $U_{\alpha/2}$ correspondant à la probabilité de dépassement de $\alpha/2$ (dans notre cas $\alpha = 5\%$).

- Si $|T|$ est inférieure à $U_{\alpha/2}$ l'hypothèse d'indépendance est vraie.
- Si $|T|$ est supérieure à $U_{\alpha/2}$ l'hypothèse d'indépendance est rejetée.

II.4.1.2 Analyse des résultats du test

Les résultats du test sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.11 : Résultats de test d'indépendance de Wald-Wolfowitz.

Station	T	$ U_{\alpha/2} $	H_0
Alger	1,32	1.96	1
Annaba	- 0,74	1.96	1
Bejaia	- 1,11	1.96	1
Skikda	- 1,05	1.96	1

Mostaganem	1,10	1.96	1
Oran	0,19	1.96	1
Tlemcen	0,77	1.96	1
Ghazaouet	0,32	1.96	1
Jijel	- 0,67	1.96	1
Arzew	1.86	1.96	1

1 : H_0 Acceptée

0 : H_0 rejetée

D'après ces résultats, l'hypothèse H_0 d'indépendance pour le pas de temps annuel est vérifiée pour le seuil de signification choisi, cela s'explique par le fait que la pluie est un phénomène aléatoire et les valeurs annuelles ne dépendent pas des valeurs enregistrées dans les années précédentes (la probabilité d'avoir une corrélation entre les données annuelles enregistrées est très faible).

II.4.2 Test d'homogénéité des fichiers

Une série de données est dite homogène si les propriétés statistiques des données restent invariables au cours de la période d'observation.

Il existe plusieurs tests pour vérifier l'homogénéité et la stationnarité des séries de données. Pour notre cas nous avons utilisé le test du double cumul pour le pas de temps annuel.

II.4.2.1 Test du double cumul (Quélenec (1973))

L'étude hydrologique nécessite de travailler avec des séries de données critiquées et corrigées afin d'éviter des incohérences et de ne pas fausser les résultats des analyses ultérieures.

Il faut tout d'abord s'assurer de la cohérence et de la fiabilité des données à chacune des stations par une approche des doubles cumuls sur les totaux annuels. Il s'agit ici de comparer les cumuls des pluies annuelles aux stations voisines prises deux à deux.

On a déterminé d'abord les périodes communes entre les deux stations. On a préparé alors pour chacune des deux stations, sur la période commune, la série des cumuls. La première valeur de la série est la valeur de la pluie annuelle de la première année commune, la seconde valeur est la somme de la première valeur et la pluie annuelle de l'année suivante, la troisième valeur est la somme de la seconde valeur et la pluie annuelle de l'année suivante, etc.

On a porté ensuite sur un graphique les deux séries obtenues, l'une en abscisse l'autre en ordonnée. Si les deux séries sont homogènes, on obtient une droite au tracé d'autant plus

net que la corrélation entre les deux stations est forte. S'il y a une cassure de la droite, ceci signifie qu'un problème a été rencontré sur une des stations à partir de la date de la cassure.

Nommons A et B ces deux premières stations, il reste alors à déterminer laquelle des deux a eu un problème. Le test doit alors être recommencé avec une troisième station C : on testera cette fois-ci les couples des cumuls des stations A et C, et B et C d'autre part.

En procédant ainsi avec toutes les stations voisines, deux à deux, et de proche en proche, on parvient à déterminer celles qui sont fiables et celles qui sont erronées. L'interprétation du graphique des doubles cumuls est parfois délicate du fait d'une ou deux années très fausses.

II.4.2.2 Analyse des résultats

Le test du double cumul a été appliqué pour contrôler l'homogénéité des séries retenues. Nous avons pris comme stations de référence trois postes pluviométriques, à l'Ouest (Station d'Oran), au Centre (Station d'Alger) et à l'Est (Station d'Annaba) pour la région d'étude. Celles-ci sont considérées comme stations de référence car elles sont complètes et ne contiennent aucune valeur manquante sur la période d'observations (1970-2014).

Nous présentons les résultats des séries de Ghazaouet, Bejaia et Skikda

Le test d'homogénéité appliqué a abouti aux résultats suivants :

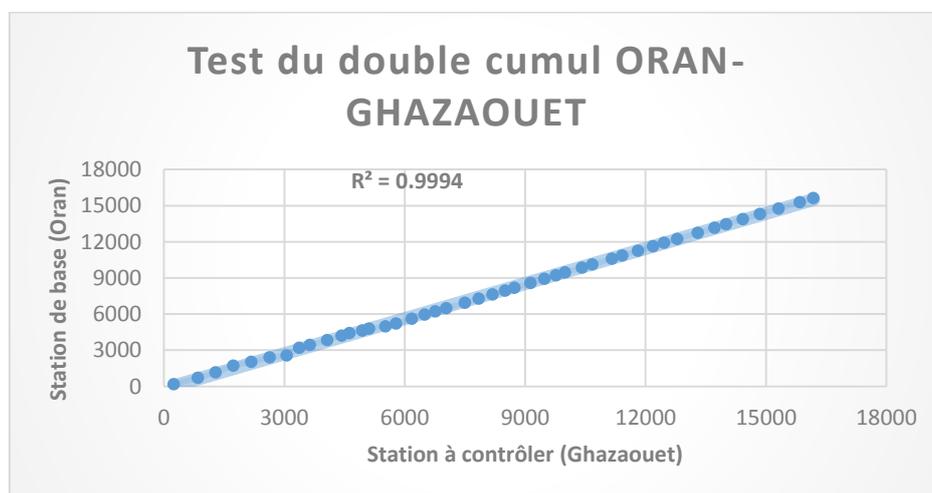


Figure II.4.a : Test de double cumul Oran-Ghazaouet

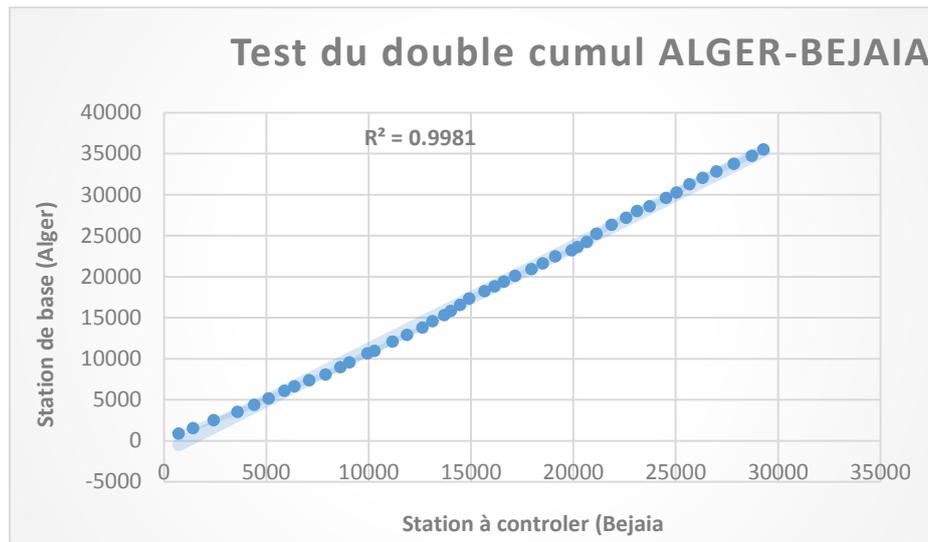
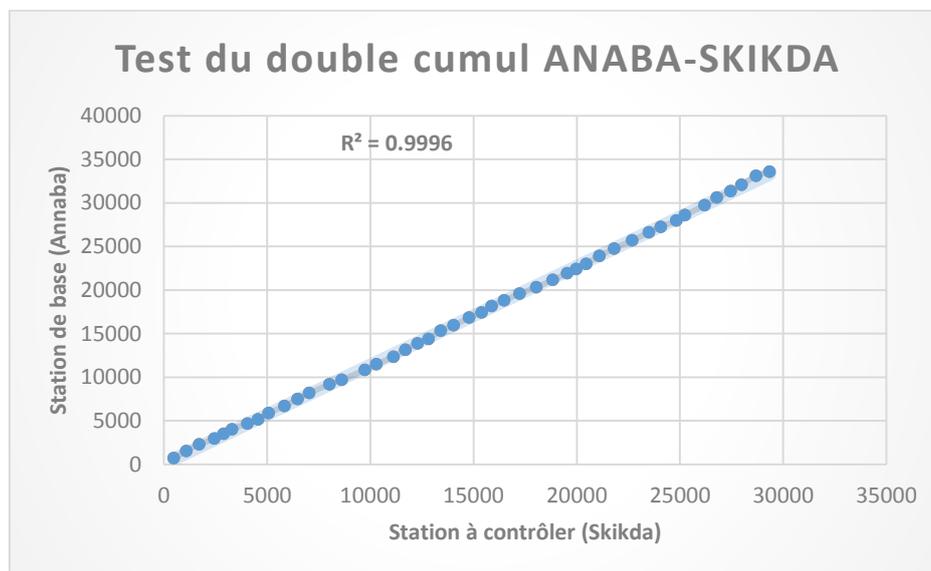


Figure II.4.b : Test du double cumul Alger-Bejaia



II.4.c : Test du double cumul Annaba-Skikda

Le tracé des droites du double cumul indique qu'aucune irrégularité apparente n'a affecté les séries à contrôler.

II.5 Conclusion

En examinant les résultats de la critique des données, nous pouvons dire que les séries d'observations retenues peuvent être considérées comme indépendantes et homogènes au pas de temps annuel.

Chapitre III

Analyse du régime
pluviométrique par les
paramètres
statistiques

III.1 Introduction

Dégager une tendance sur les précipitations à partir des observations est difficile en raison de leur imprévisibilité. Toutefois, l'analyse des longues séries climatiques reste certainement la méthode la plus sûre. Ce chapitre présente l'intérêt de certaines méthodes statistiques pour interpréter la variabilité temporelle des précipitations et peut aider à connaître la variabilité d'un régime pluviométrique.

Les données étant homogènes, on peut estimer les paramètres statistiques sur la totalité des séries pluviométriques.

III.2 Evolution de la pluviométrie

La **figure III.1** montre l'évolution des pluies annuelles de chaque station du littoral Algérien de la période d'étude (1970-2014).

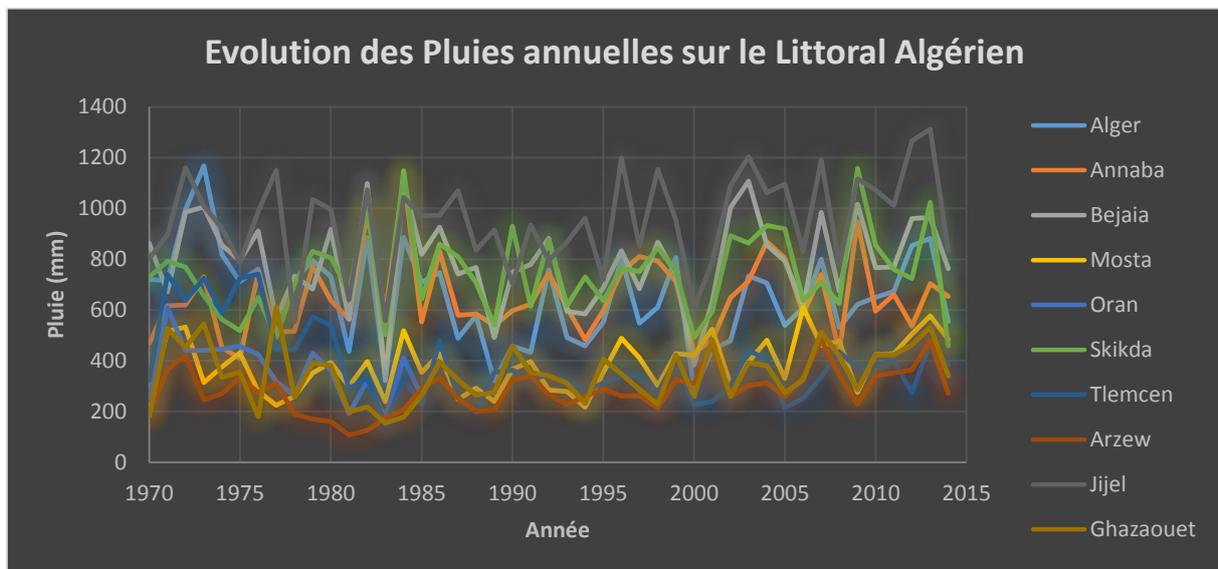


Figure III.1 : Evolution des pluies annuelles sur le littoral Algérien

L'analyse de cette figure montre le caractère aléatoire du phénomène étudié, pour toutes les stations.

En outre, on remarque une différence significative des précipitations entre les différentes stations (exemple : Jijel et Arzew).

III.3 Analyse temporelle des séries pluviométriques

Pour analyser la variabilité des précipitations annuelles, on a recours à des méthodes répandues telles que l'analyse des paramètres statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de

variation, indice de variation), la moyenne mobile pondérée, l'indice de l'écart moyen relatif, l'indice de pluviosité et l'indice standardisé de précipitation.

Le Coefficient de Variation (**C.V**) est un paramètre de dispersion des précipitations. C'est le rapport entre l'écart-type divisé par la moyenne. Il donne la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Quant à l'Intervalle de Variation (**I.V**), c'est la différence entre la précipitation maximale et la précipitation minimale annuelle de la série.

La moyenne mobile pondérée permet de lisser la courbe évolutive des précipitations annuelles. Elle traduit mieux le comportement de la pluviométrie au niveau de la station sur la période étudiée. Nous avons eu recours dans le cadre de notre analyse à une moyenne glissante sur une période de 5 ans.

La méthode des écarts moyens permet d'évaluer les excédents ou les déficits d'une année quelconque par rapport à la moyenne de la série.

III.3.1 Pas de temps annuel

III.3.1.1 Période Totale

Dans le but d'évaluer la tendance évolutive des différentes stations, une analyse des données pluviométriques a été effectuée sur une série d'observations allant de 1970 à 2014.

Les résultats des calculs des moyennes, des écarts-types et des coefficients de variation pondérés des séries pluviométriques de chaque station sont résumés dans le **tableau III.1**.

Tableau III.1 : Paramètres statistiques des stations étudiées

Station	Moyenne (mm)	Ecart-Type (mm)	Coefficient de Variation (%)
Arzew	281.9	85.2	30.2
Ghazaouet	347.3	110.8	31.9
Oran	359.6	96.1	26.7
Mostaganem	380.8	103.8	27.2
Tlemcen	389.4	149.7	38.4
Alger	651	185.1	28.4
Annaba	652.2	153.5	23.5
Skikda	745.9	166.3	22.3
Béjaia	789.1	180.8	23
Jijel	950.8	186.2	19.5

Ces résultats montrent une différence très importante des précipitations entre la région de l'Ouest et celles du Centre et de l'Est, cette inégalité des précipitations est due à deux causes principales :

- La direction des vents, qui est généralement de Nord-Ouest, ce qui fait que l'Ouest Algérien ne bénéficie pas suffisamment de l'humidité apporté par ce dernier contrairement à la région Centre et Est.
- L'effet de foehn dû aux montagnes de la Sierra Nevada en Espagne et à la chaîne montagneuse du Rif de l'Est du Maroc, ces barrières géographiques interviennent pour beaucoup dans le faible volume de pluie qui s'abat sur la côte Ouest de l'Algérie.

La conjugaison de ces deux phénomènes, aboutit à des différences très caractérisées de la pluviométrie sur le littoral Algérien entre les régions Ouest et celles du Centre et de l'Est (**Figure III.2**). Ces deux facteurs ont un effet direct sur la variabilité spatiale de la pluviométrie ainsi que sur la réduction des précipitations dans la région Ouest.

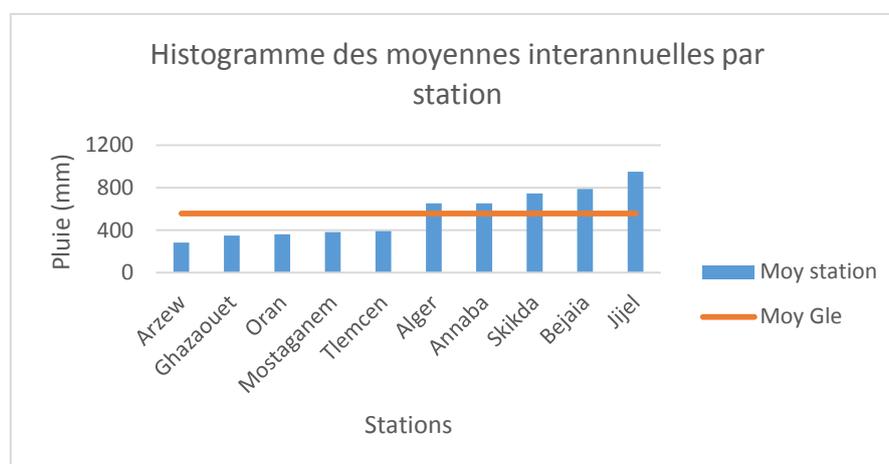


Figure III.2 : Moyennes interannuelles des pluies sur le littoral Algérien

Le tableau III.1 et la **figure III.2** permettent de noter également que toutes les moyennes des stations de l'Ouest sont en dessous de la moyenne totale sur le littoral Algérien, alors que les stations du Centre et de l'Est dépassent visiblement cette moyenne. En outre, on note que la plus faible quantité de pluies enregistrée sur le littoral Algérien est celle d'Arzew avec une moyenne de 281 mm alors que la plus arrosée est celle de Jijel avec 950 mm de moyenne.

Afin d'interpréter l'intensité des irrégularités pluviométriques, nous avons calculé aussi le coefficient de variation pondéré (**Cv %**), qui est un coefficient qui se révèle le plus satisfaisant pour mesurer la dispersion des variables autour de la moyenne, selon Arléry (1973).

Les coefficients de variation des dix (10) stations varient entre 19.5% et 38.4 % dont le minimum est observé à Jijel et le Maximum à Tlemcen, il augmente remarquablement de l'Est vers l'Ouest.

D'une manière générale, la variabilité relative croit quand la pluviométrie diminue. Cela montre que l'irrégularité pluviométrique est d'autant plus importante que le climat est

plus aride. Ainsi, on a des coefficients de variations faibles dans les régions humides du Nord - Est du pays. Par contre, dès qu'on s'éloigne vers l'Ouest qui est plus aride, on constate que l'irrégularité pluviométrique devient plus élevée. Ainsi, on note, une forte variabilité relative des pluies annuelles, dans des stations comme celles de Tlemcen 38 %, Ghazaouet 32 % et Arzew 30 %.

III.3.1.1.a Etude de variation par station

Pour mieux comprendre la variation du phénomène pluviométrique sur le littoral Algérien nous avons jugé utile d'affiner notre étude en s'intéressant à chaque série séparément, en déterminant les valeurs maximales et minimales annuelles des dix Stations ainsi que leur intervalle de variation. Le **Tableau III.2** et la **figure III.3** montrent cette variation.

Tableau III.2 : Maxima, Minima et Intervalles de variation des précipitations par station

Stations	Pluie Max (mm)		Pluie Min (mm)		Intervalle de Variation (mm)
	Totale	Année	Totale	Année	
Arzew	481.5	2007	107.2	1981	374.3
Ghazaouet	613.3	1977	154	1983	459.3
Oran	609	1971	172.7	1983	436.3
Mostaganem	610.1	2007	216.4	1994	393.7
Tlemcen	740.9	1971	149.5	1983	591.4
Alger	1167.8	1973	282.6	2000	885.2
Annaba	1127.2	1984	409	1975	718.2
Skikda	1157.8	2009	457.8	2014	700
Béjaia	1108.2	2003	321.2	1983	787
Jijel	1313.1	2013	553.2	1978	759.9

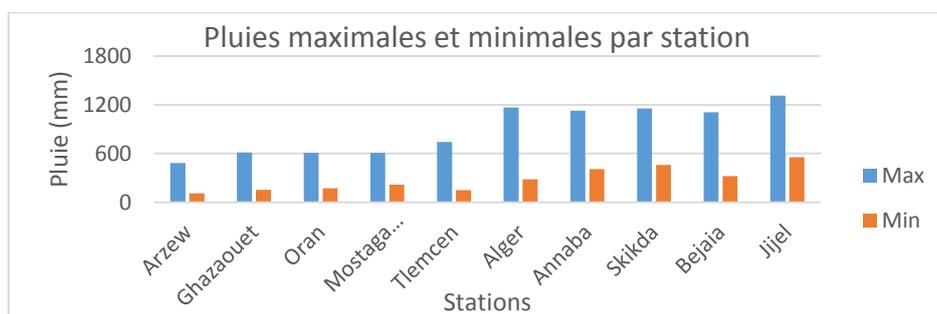
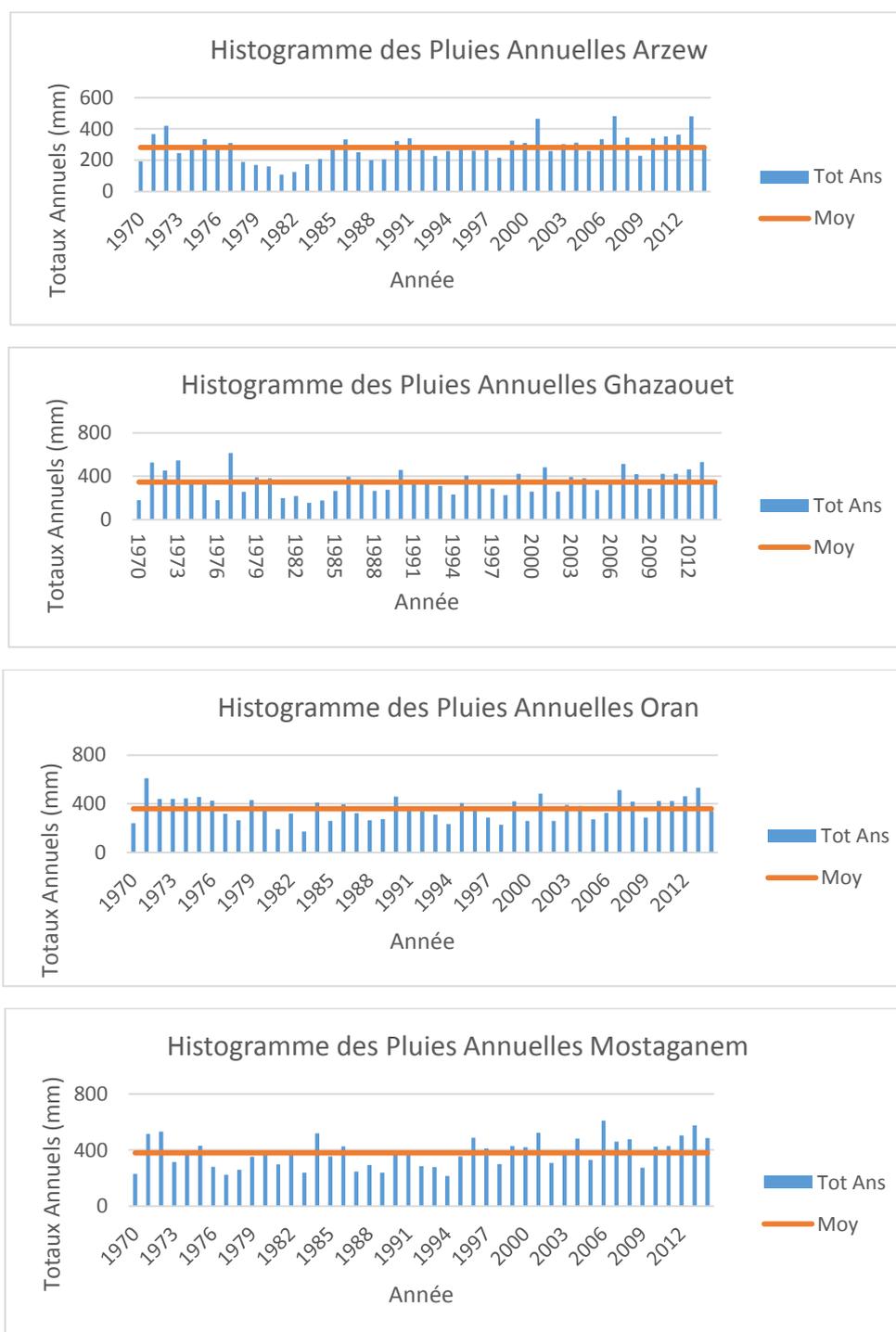


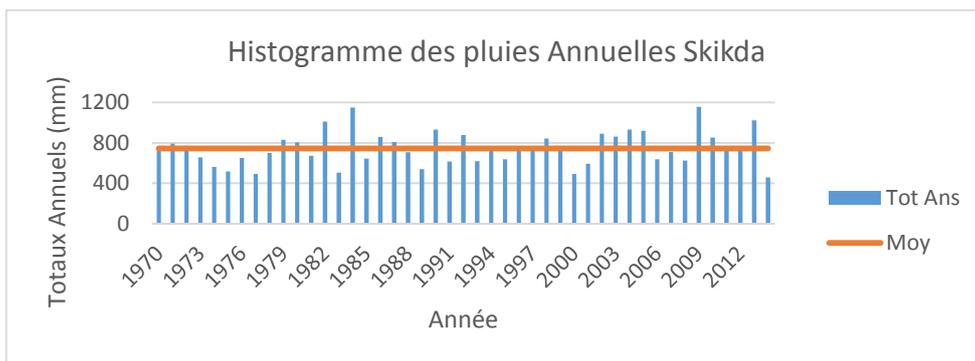
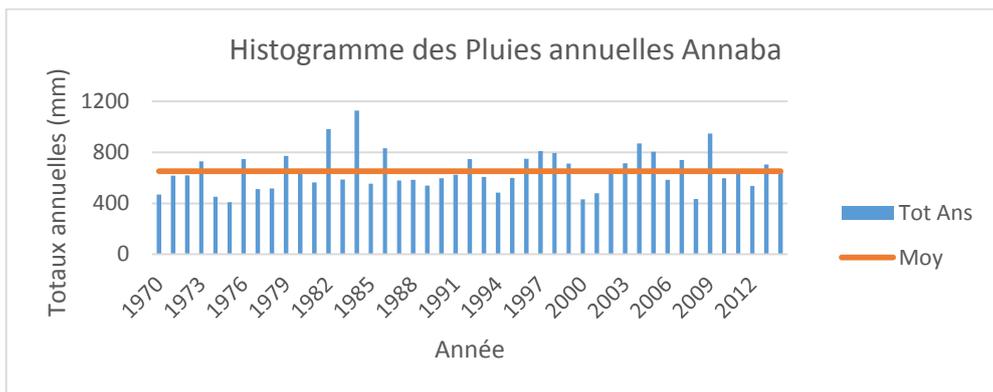
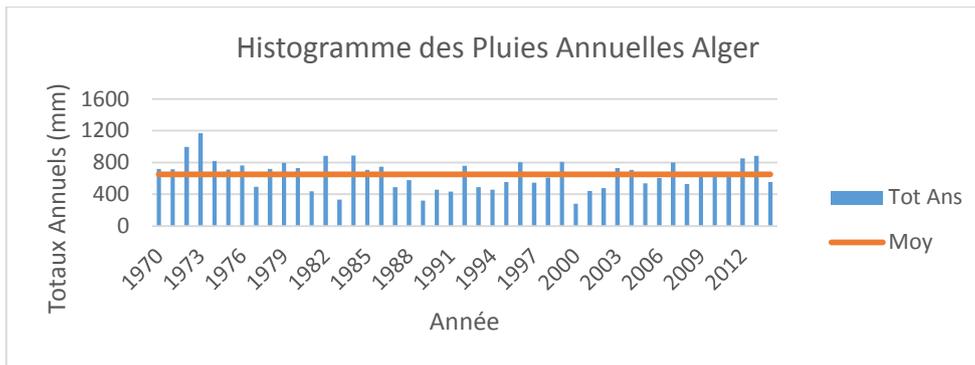
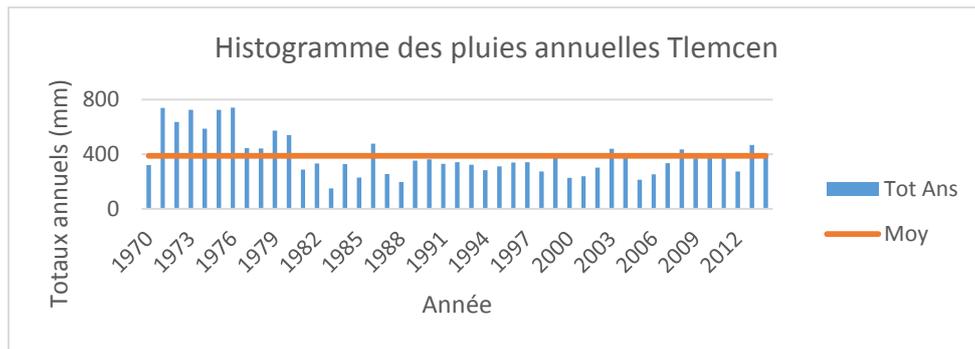
Figure III.3 : Variation des précipitations par station

L'importance du **tableau III.2** et de la **figure III.3** réside dans le fait de mettre en évidence les fortes variations et les irrégularités extrêmes qu'a connu le littoral Algérien pendant les 45 années d'observations (1970-2014). A titre d'exemple, la station d'Alger a enregistré une valeur annuelle maximale de 1167 mm en 1973 soit cinq (5) fois la valeur

minimale enregistrée en 2000 (282 mm) ce qui confirme cette variabilité climatique jugée comme très forte.

Pour mieux appréhender le phénomène pluviométrique sur le littoral Algérien, nous nous sommes intéressés également aux précipitations de chaque station ainsi qu'à leurs variations autour de la moyenne en dénombrant le nombre des années déficitaires et excédentaires. **La figure III.4** et le **tableau III.3** résument les résultats obtenus.





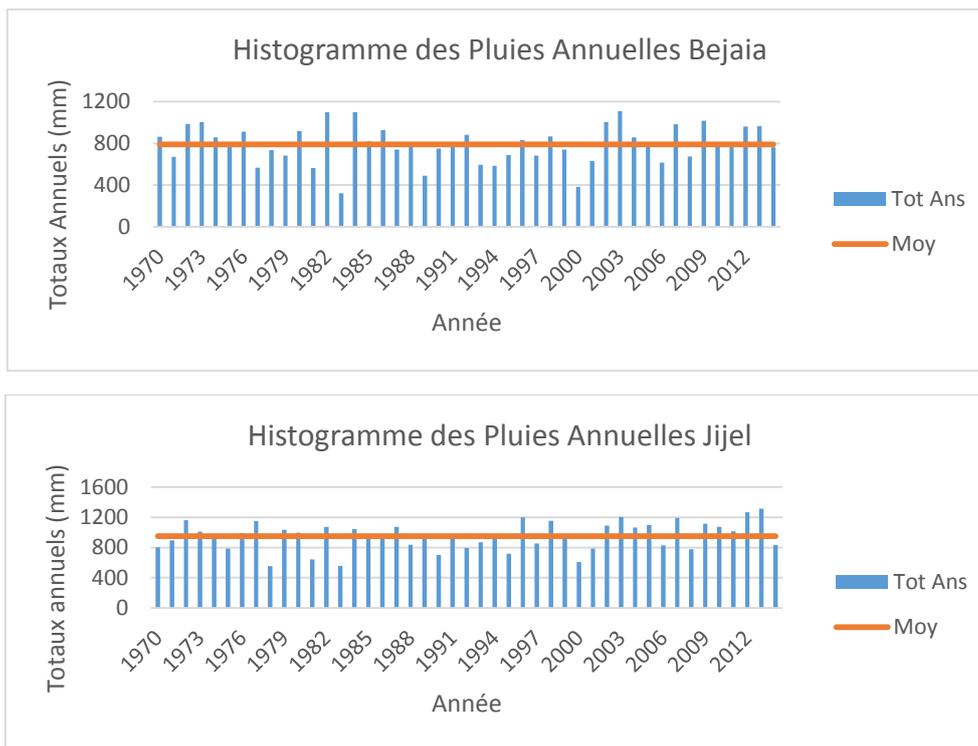


Figure III.4 : Histogrammes de la pluviométrie par station

Tableau III.3 : Variation des précipitations par station

Station	Moyenne (mm)	Années Déficitaires		Années Excédentaires	
		Totale	%	Totale	%
Arzew	281.9	24	53	21	47
Ghazaouet	317.1	23	51	22	49
Oran	359.6	23	51	22	49
Mostaganem	380.8	22	49	23	51
Tlemcen	389.4	28	62	17	38
Alger	651.0	22	49	23	51
Annaba	652.2	26	58	19	42
Skikda	745.9	23	51	22	49
Béjaia	789.1	23	51	22	49
Jijel	950.0	20	44	25	56

A partir de ces résultats nous constatons que :

- 6 stations (Ghazaouet, Oran, Mostaganem, Alger, Bejaia et Skikda) ont connu sur la période d'étude, un épisode pluviométrique dont le nombre d'années déficitaire est presque égal au nombre d'années excédentaire.
- Les histogrammes des stations d'Arzew, Tlemcen et Annaba montrent que ces régions ont vécu une succession d'années sèches, ce qui explique pourquoi le nombre d'années déficitaire est supérieur au nombre d'années excédentaire.

- Seule la région de Jijel a connu un épisode pluviométrique nettement supérieur à la moyenne, cette région est très humide et dépasse souvent le seuil des 1000 mm.

III.3.1.1.b Etude de variation par région

A la lumière de tout ce que l'on vient de voir, nous pouvons dire que le littoral Algérien n'est pas soumis au même climat et donc pas au même régime pluviométrique. En effet, ce dernier peut être subdivisé en trois régions : Ouest, Centre et Est. Ces régions étant plus homogènes du point de vue climatique, on peut s'intéresser à leurs caractéristiques statistiques (**Tableau III-4**).

Tableau III.4 : Répartition des pluies par régions

Région	Ouest	Centre	Est
Moyenne régionale (mm)	351.8	651	784.5

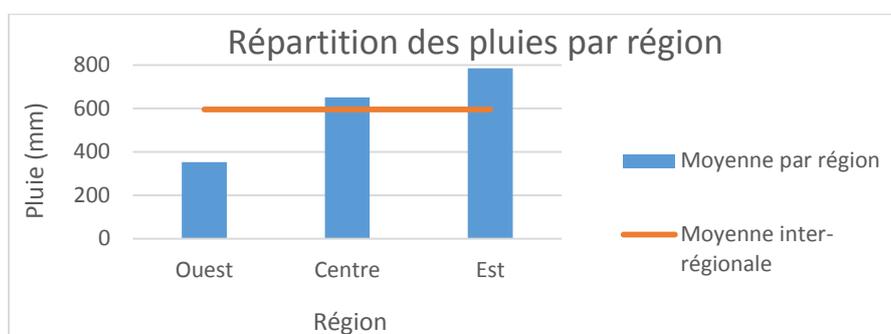


Figure III.5 Répartition des pluies par région

Le **tableau III.4** et la **figure III.5** représentent la répartition des pluies annuelles par région. On remarque que la quantité de pluie tombée à l'Est est deux fois supérieure à celle enregistrée à l'Ouest, ou le total interannuel est visiblement en-dessous de la moyenne interrégionale. Cela dénote une grande variation climatique vis-à-vis du paramètre pluviométrique entre les trois régions de la zone d'étude, celui-ci varie d'une façon ascendante de l'Ouest vers l'Est.

III.3.1.2. Etude sur 4 périodes

Subdivisons les séries pluviométriques en quatre (04) périodes possédant chacune d'entre elles douze (12) années d'observations :

1^{ère} période	1970-1981	1 ^{ère} série
2^{ème} période	1981-1992	2 ^{ème} série
3^{ème} période	1992-2003	3 ^{ème} série
4^{ème} période	2003-2014	4 ^{ème} série
Période Totale	1970-2014	5 ^{ème} série

Le calcul de la moyenne et de l'écart type de chaque station pour quatre les (04) périodes et pour la période totale sont donnés dans le **tableau III.5**.

Tableau III.5 : Paramètre statistiques pour les 4 périodes

Station	Période	Moyenne	Ecart-Type
Arzew	1970-1981	253.1	93.1
	1981-1992	234.9	78.2
	1992-2003	286.3	64.6
	2003-2014	338.9	77.5
	1970-2014	281.9	85.2
Ghazaouet	1970-1981	367.4	147.3
	1981-1992	284.9	91.9
	1992-2003	330.1	81.8
	2003-2014	397.2	82.3
	1970-2014	347.3	110.8
Oran	1970-1981	384.8	115.4
	1981-1992	313.5	85.7
	1992-2003	330.1	81.8
	2003-2014	397.2	82.3
	1970-2014	359.6	96.1
Mostaganem	1970-1981	350.3	103.1
	1981-1992	338.1	87.0
	1992-2003	367.1	92.5
	2003-2014	453.7	93.9
	1970-2014	380.8	103.8
Tlemcen	1970-1981	563.9	160.7
	1981-1992	303.6	87.0
	1992-2003	318.5	61.5
	2003-2014	363.3	79.4
	1970-2014	389.4	149.7
Alger	1970-1981	755.9	192.8
	1981-1992	586.3	203.4
	1992-2003	580.5	165.0
	2003-2014	679.4	119.3
	1970-2014	651.0	185.1
Annaba	1970-1981	587.0	120.5
	1981-1992	692.3	191.8
	1992-2003	648.0	128.6
	2003-2014	686.9	143.1
	1970-2014	652.2	153.5
Skikda	1970-1981	681.6	112.3
	1981-1992	776.3	196.6
	1992-2003	734.6	127.1
	2003-2014	805.5	192.3
	1970-2014	745.9	166.3
Béjaia	1970-1981	795.8	152.4
	1981-1992	770.1	229.7

	1992-2003	749.9	200.0
	2003-2014	856.0	150.1
	1970-2014	789.1	180.8
Jijel	1970-1981	911.7	187.4
	1981-1992	876.3	171.3
	1992-2003	932.9	195.7
	2003-2014	1064.5	174.8
	1970-2014	950.8	186.2

La **figure III.6** représente la répartition des moyennes des pluies annuelles des dix (10) stations pour les différentes périodes retenues.

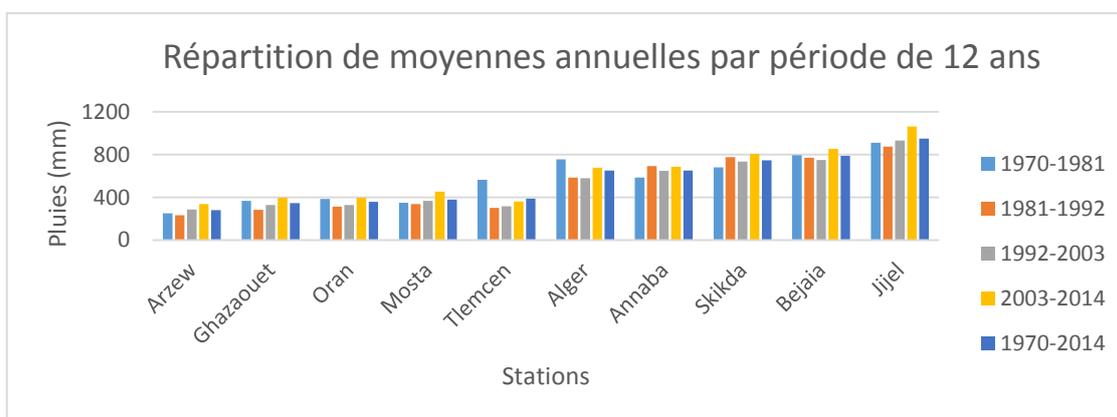


Figure III.6 : Répartition des pluies Annuelles par période de 12 ans

L'analyse de cette figure montre que la période 2003 à 2014 représente la période la plus humide pour toutes les stations, exceptée pour les stations de Tlemcen et Alger où c'était la première période allant de 1970 à 1981 qui était la plus arrosée.

Les résultats des moyennes régionales sur la même période d'étude sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Répartition des pluies par région et par période (12 ans)

Période \ Région	Ouest	Centre	Est
	Pluie (mm)		
1970-1981	383.9	755.9	744.0
1981-1992	295.0	586.3	778.7
1992-2003	326.4	580.5	766.3
2003-2014	390.0	679.4	853.2
1970-2014	351.8	651.0	784.5

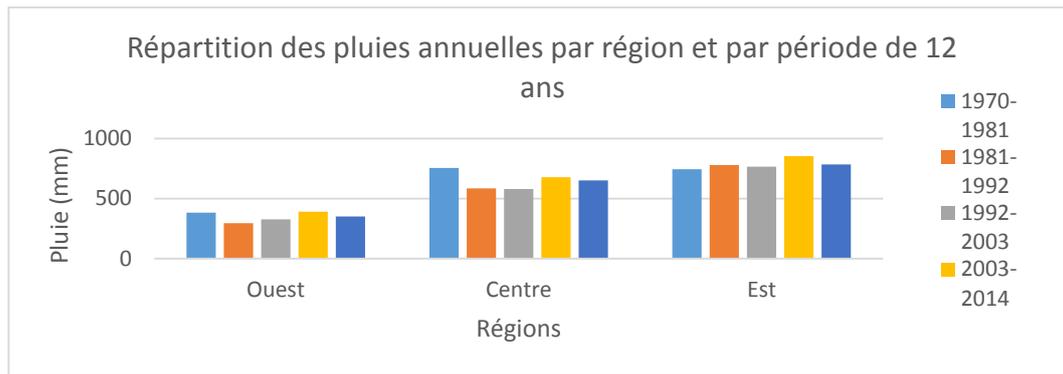


Figure III.7 : Moyennes des pluies annuelles des 3 régions pour des périodes de 12 ans

L'analyse de cette figure montre aussi que la période 2003 à 2014 représente la période la plus humide pour les régions de l'Ouest et de l'Est, alors que pour la région Centre, c'est toujours la première période allant de 1970 à 1981 qui était la plus arrosée, néanmoins pour la période allant de 2003 à 2014, la région Centre n'est pas déficitaire et possède même un excédent de 5% par rapport à la moyenne, et que par conséquent cette dernière période représente un cycle pluviométrique humide pour le littoral Algérien.

III.4 Evolution du régime pluviométrique

III.4.1 METHODOLOGIE

Le travail se base sur l'utilisation de plusieurs indices de sécheresse choisis pour leur facilité d'utilisation et leur efficacité en terme de suivi de la progression de la sécheresse et de l'évaluation des fluctuations climatiques, qui a été démontrée dans plusieurs travaux de recherches : HOUCINI (2002), BERGAOUI (2001), HAIDA et al.(1999), PROBST (1989).

Le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année et les grandes tendances, l'ampleur de la sécheresse et l'intensité ont été évalués en utilisant, la moyenne mobile, l'indice de l'écart à la moyenne (E_m)

(LE GOFF 1985, cité par YACOUBI), l'indice de pluviosité (I_p), et l'indice standardisé de précipitation (SPI), (Mc KEE et al.1993).

L'écart à la moyenne (E_m) est la différence entre la hauteur des précipitations annuelles (P_i) et la hauteur moyenne annuelle des précipitations (P_m) :

$$E_m = P_i - P_m$$

On parle d'année déficitaire (sèche) quand la pluie est inférieure à la moyenne et d'année excédentaire (humide) quand la moyenne est dépassée.

Les années peuvent être très déficitaires ou très excédentaires. L'ampleur de la sécheresse a été définie comme étant la somme des années détectées sèches ou très sèches.

Une année sèche est une année ayant reçu une précipitation inférieure à la moyenne.

Une année très sèche est une année ayant reçu des précipitations inférieures à la moyenne des années sèches.

L'intensité de la sécheresse est définie comme étant le rapport du déficit cumulé à sa durée.

L'indice de pluviosité (I_p), est le rapport de la hauteur des précipitations annuelles à la hauteur moyenne des précipitations :

$$I_p = P_i / P_m$$

Une année est humide quand $I_p > 1$, et sèche quand $I_p < 1$. L'indice de l'écart proportionnel à la moyenne ($I_{pm} = I_p - 1$) est utilisé pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques.

L'indice standardisé de précipitation (SPI), ou en anglais Standardized Precipitation Index (*SPI*) a été développé en 1993 par Mc KEE, N.J. DOESKEN & J. KLEIST de l'Université de l'Etat du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques pour une période donnée et répond à la formule suivante :

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma$$

SPI = Indice pluviométrique,

P_i : est le cumul de la pluie pour une année *i* ;

P_m : la moyenne des pluies annuelles observées pour une série donnée ;

σ : l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée

La sécheresse se caractérise par un **SPI** négatif et se termine quand il devient positif.

Cet indice à l'avantage de pouvoir déterminer le déficit hydrique à l'échelle des saisons et à l'échelle de l'année.

Cet indice définit la sévérité de la sécheresse en différentes classes (**Tableau. III-7**) (M. BERGAOUI et A. ALOUINI, 2001 ; S. ARDOIN-BARDIN *et al.*, 2003 ; S. ARDOIN-BARDIN, 2004 ; A. ALI et T. LEBEL, 2009 ; T. LEBEL et A. ALI, 2009). Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide.

Tableau III.7 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

Classes du SPI	Degré de Sècheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1 < SPI < 2$	Humidité forte
$0 < SPI < 1$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$	Sècheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	Sècheresse forte
$SPI < -2$	Sècheresse extrême

Le *SPI* a été employé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (L. GIDDINGS *et al.*, 2005 ; H. WU *et al.*, 2001 ; S.K.L. SÖNMEZ *et al.*, 2005 ; A. BODIAN, 2014).

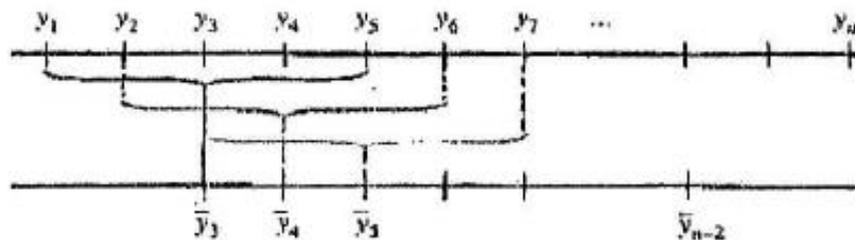
La moyenne mobile (m_m) : elle permet d'atténuer les variations d'une série chronologique en calculant la moyenne arithmétique d'un nombre k de valeurs successives qu'on affecte à la moyenne arithmétique des dates d'observation. Ainsi, **la figure III.8** nous montre la façon de procéder pour obtenir cette moyenne :

Par exemple, si $k = 5$ on prend tout d'abord la moyenne des 5 premières observations y_1, \dots, y_5 que l'on attribue à la date 3, valeur centrale des 5 premières dates d'observations.

Cette moyenne est notée :

$$\bar{y}_3 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5}{5}$$

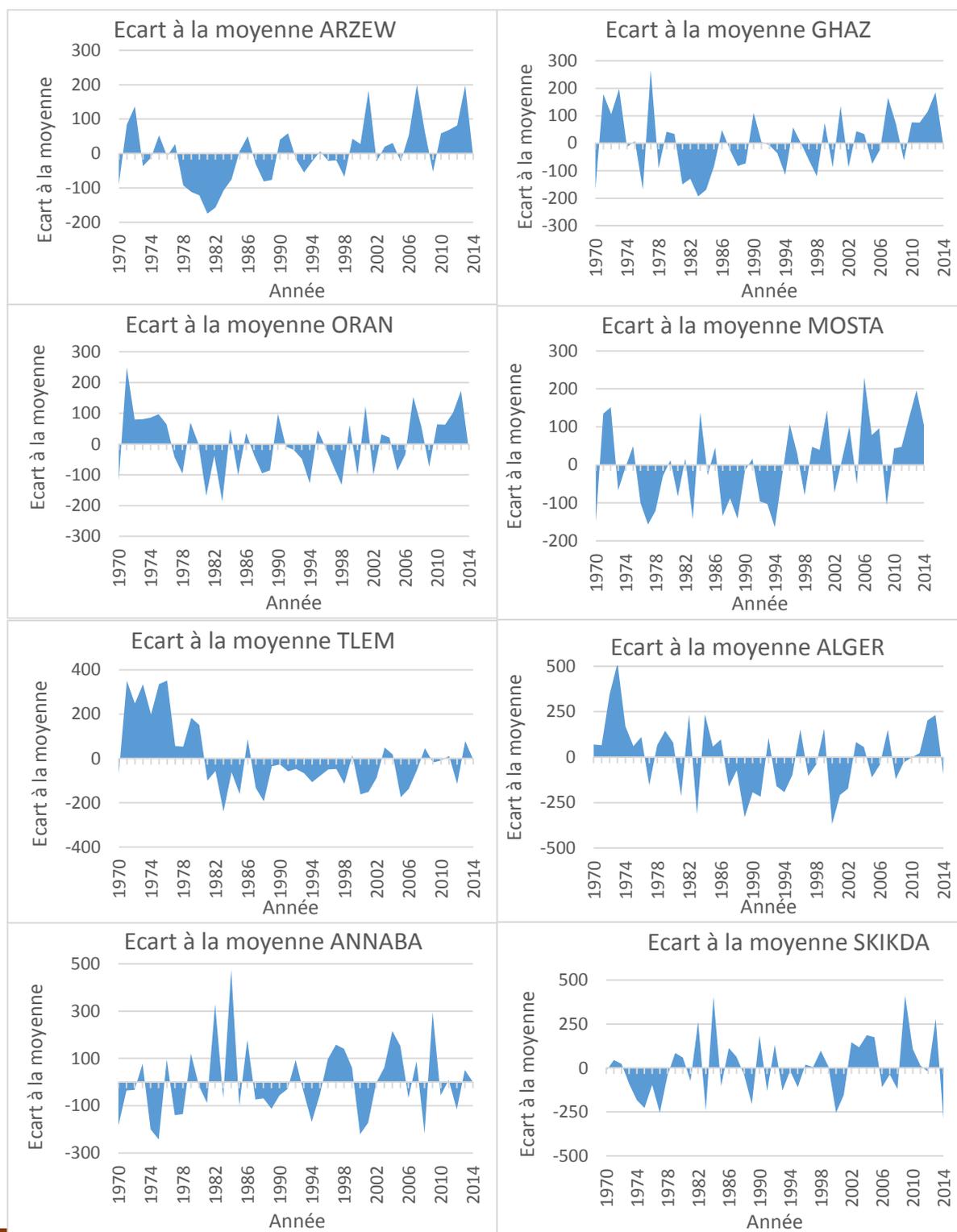
Ensuite, on applique la même procédure sur le groupe des observations $\{y_2, \dots, y_6\}$ pour avoir la moyenne \bar{y}_4 , et ainsi de suite jusqu'à la valeur $N-2$ qui sera selon ce processus la moyenne des 5 dernières valeurs de la série chronologique.

**Figure III.8 : Moyenne Mobile d'ordre 5**

III.4.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.4.2.1 Ecart à la moyenne (E_m)

L'indice de l'écart à la moyenne (E_m) a été utilisé pour l'évaluation du déficit pluviométrique sur une série d'observations allant de 1970 à 2014. On note une importante fluctuation (**Figure III.9**) des périodes sèches et humides avec une légère tendance à la sécheresse.



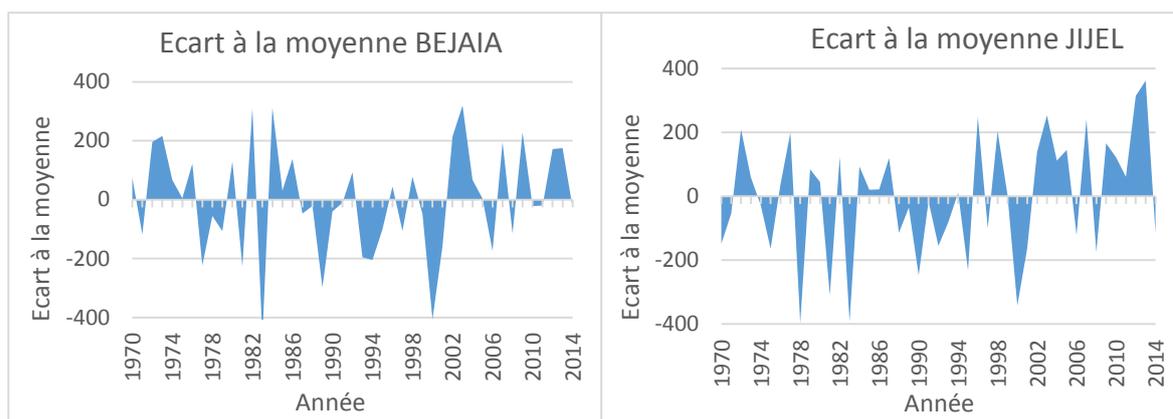


Figure III.9 : Indice de l'écart à la moyenne

La période de sécheresse la plus longue qui affecte la majorité des stations du littoral, s'étale de 1981 à 1993, avec quelques intercalations d'épisodes humides qui ont des durées comprises entre 1 et 4 années selon les stations.

On note, soit un excédent de pluie, soit un déficit, sur des durées plus ou moins longues et avec des intensités variables (Tableaux III.8 et III.9).

Tableau III.8 : Caractéristiques de la période sèche pour les différentes stations (1970-2014)

Stations	Nombre de séquences*	Durée (an)	Déficit Cumulé (mm)	Intensité**moyenne (mm)
Arzew	5	24	1489	62
Ghazaouet	5	23	2027	88
Oran	6	23	1806	78
Mostaganem	4	22	1963	89
Tlemcen	5	28	2567	91
Alger	4	23	3408	148
Annaba	7	26	2701	103
Skikda	5	23	2942	127
Bejaia	4	23	3189	138
Jijel	4	20	3396	169
Moyenne	5	23	2549	110

* Intervalle d'années successives sèches.

** L'intensité moyenne de la période sèche est définie comme étant le rapport du déficit cumulé à sa durée.

Tableau III.9 : Caractéristiques de la période humide pour les différentes stations (1970-2014)

Stations	Nombre de séquence*	Durée (an)	Excédent Cumulé (mm)	Intensité** moyenne (mm)
Arzew	7	21	1489	135
Ghazaouet	6	22	2027	92
Oran	5	22	1806	82
Mostaganem	6	23	1963	85
Tlemcen	2	17	2567	151
Alger	5	22	3408	154
Annaba	4	19	2701	142
Skikda	6	22	2942	133
Bejaia	4	22	3189	145
Jijel	6	25	3396	135
Moyenne	5	22	2549	126

* Intervalle d'années successives humides.

** L'intensité moyenne de la période humide est définie comme étant le rapport du déficit cumulé à sa durée.

L'intensité moyenne des précipitations à l'échelle du littoral, montre un déficit moyen de la série étudiée de 110 mm pour la période sèche et un excédent moyen de 126 mm pour la période humide.

✓ Ampleur de la période sèche et de la période humide

L'analyse des résultats issus de l'indice de l'écart à la moyenne (E_m), a permis de mettre en évidence parmi les séquences sèches et humides, celles qui sont très déficitaires et très excédentaires. Ces dernières ont été définies comme étant la somme des années détectées sèches ou très sèches par rapport à la moyenne annuelle des années sèches.

L'analyse des résultats révèle des périodes sèches, relatives à la période 1970 à 2014, plus persistantes que les périodes humides.

Les périodes sèches et très sèches montrent des durées moyennes de 23 ans, soit 51,1 % de la série étudiée (**Tableau III.10**). Alors que les durées moyennes humides et très humides, calculées de la même façon, sont de l'ordre de 22 ans, soit 48,9 % (**Tableau III.11**).

Tableau III.10 : Durée des périodes sèches dans les différentes stations (1970-2014)

Stations	Nombre d'années sèches	Fréquence (%)	Nombre d'années très sèches	Fréquence (%)
Arzew	13	29	11	24
Ghazaouet	14	31	10	22
Oran	11	24	12	26

Mostaganem	11	24	11	24
Tlemcen	17	38	11	24
Alger	11	25	11	24
Annaba	15	34	11	24
Skikda	12	27	11	24
Bejaia	14	31	9	20
Jijel	13	29	7	16
Moyenne	13	29	10	22

Tableau III.11 : Durée des périodes humides dans les différentes stations (1970-2014)

Stations	Nombre d'années humides	Fréquence (%)	Nombre d'années très humides	Fréquence (%)
Arzew	16	36	5	11
Ghazaouet	12	27	9	20
Oran	15	34	7	16
Mostaganem	12	27	11	24
Tlemcen	9	20	8	18
Alger	13	29	10	22
Annaba	11	24	8	18
Skikda	13	29	9	20
Bejaia	12	27	10	22
Jijel	14	31	11	24
Moyenne	13	29	9	20

III.4.2.2 Indice de pluviosité (I_p)

L'analyse des précipitations reçues sur le littoral Algérien, pour la période 1970 à 2014, par l'indice de pluviosité « I_p », montre des résultats similaires à ceux obtenus par l'indice de l'écart à la moyenne (E_m). Il a permis de situer les séries étudiées et de regrouper les grandes tendances climatiques.

On note une succession d'épisodes secs et d'épisodes pluvieux (**Tableau III.12**), les années de sécheresse communes à l'ensemble des stations sont : 1981, 1983, 1988, 1989, 1993 et 1994 à l'exception de la station de Jijel pour l'année 1994.

Les années les plus excédentaires correspondent aux années 1972, 1986, 1999, 2003, 2004, 2011 et 2013, qui enregistrent des quantités très supérieures à la moyenne, à l'exception des stations d'Annaba pour l'année 1972 et Bejaia pour les années 1999 et 2011.

On constate que les épisodes secs se répètent généralement après des intervalles de 1 à 5 années humides selon les régions. La station de Tlemcen enregistre le nombre maximal d'années successives déficitaires, qui est de 12 depuis 1987, et au même temps le nombre maximal d'années successives excédentaires, qui est de 10 depuis 1971.

La tendance générale des précipitations sur le littoral Algérien est à la hausse, ce phénomène touche la majorité des stations étudiées, même la région de l'Ouest qualifiée de subhumide.

Tableau III.12 : Evolution du régime pluviométrique annuel des différentes stations estimé à l'aide de l'indice de pluviosité (I_p)

Station Année	ARZ	GHA	ORN	MOS	TLE	ALG	ANB	SKI	BEJ	JIJ
1970	S	S	S	S	S	H	S	S	H	S
1971	H	H	H	H	H	H	S	H	S	S
1972	H	H	H	H	H	H	S	H	H	H
1973	S	H	H	S	H	H	H	S	H	H
1974	S	S	H	S	H	H	S	S	H	S
1975	H	H	H	H	H	H	S	S	H	S
1976	S	S	H	S	H	H	H	S	H	H
1977	H	H	S	S	H	S	S	S	S	H
1978	S	S	S	S	H	H	S	S	S	S
1979	S	H	H	S	H	H	H	H	S	H
1980	S	H	H	H	H	H	S	H	H	H
1981	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1982	S	S	S	H	S	H	H	H	H	H
1983	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1984	S	S	H	H	S	H	H	H	H	H
1985	H	S	S	S	S	H	S	S	H	H
1986	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
1987	S	S	S	S	S	S	S	H	S	H
1988	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1989	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1990	H	H	H	S	S	S	S	H	S	S
1991	H	H	S	H	S	S	S	S	S	S
1992	S	S	S	S	S	H	H	H	H	S
1993	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1994	S	S	S	S	S	S	S	S	S	H
1995	H	H	H	S	S	S	S	S	S	S
1996	S	S	S	H	S	H	H	H	H	H
1997	S	S	S	H	S	S	H	H	S	S
1998	S	S	S	S	S	S	H	H	H	H
1999	H	H	H	H	H	H	H	H	S	H
2000	H	S	S	H	S	S	S	S	S	S
2001	H	H	H	H	S	S	S	S	S	S
2002	S	S	S	S	S	S	S	H	H	H
2003	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2004	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2005	S	S	S	S	S	S	H	H	H	H
2006	H	S	S	H	S	S	S	S	S	S
2007	H	H	H	H	S	H	H	S	H	H
2008	H	H	H	H	H	S	S	S	S	S

2009	S	S	S	S	S	S	H	H	H	H
2010	H	H	H	H	S	S	S	H	S	H
2011	H	S	H							
2012	H	H	H	H	S	H	S	S	H	H
2013	H									
2014	S	S	S	H	S	S	H	S	S	S

III.4.2.3 Indice Standardisé de Précipitation (SPI)

La caractérisation de la sécheresse par l'indice « *SPI* », confirme le caractère récurrent du phénomène déterminé par les indices de sécheresse E_m et I_p , avec une meilleure précision et caractérisation du phénomène, mettant en évidence les grandes tendances évolutives durant la période analysée. Il a fait apparaître :

- des périodes à tendance sèche dont l'extension a été à peu près généralisée à l'échelle du littoral qui sont : 1970, 1978, 1981, 1982, 1987, 1988, 1989, 1993, 1994, 2000, 2006 et 2014. Les années les plus déficitaires et les plus communes pour l'ensemble des stations sont : 1981, 1983 1988, 1989 et 1993.
- des périodes à tendance humide affectant tout le littoral : 1972, 1980, 1986, 1999, 2003, 2004, 2007 2011 et 2013. Les années les plus excédentaires et les plus communes pour l'ensemble des stations sont : 1986, 2003, 2004 et 2013.

Pour le reste, le phénomène est plus ou moins ressenti. L'indice *SPI* montre que la durée maximale séparant les deux sécheresses généralisées enregistrées en 1983 et 1988 est de 5 ans (**Tableau III-13**). La durée de la sécheresse varie selon les régions d'une année à douze. On peut dire que la sécheresse n'est pas un phénomène homogène, elle s'étend sur des périodes différentes, avec une intensité variable, elle affecte également des zones ayant diverses caractéristiques topographiques et climatiques.

Tableau III.13 : Caractérisation de la sécheresse par l'indice (SPI) des différentes stations pluviométriques

Station Année	ARZ	GHA	ORN	MOS	TLE	ALG	ANB	SKI	BEJ	JIJ
1970	S	S	S	S	MS	MH	S	MS	MH	MS
1971	MH	H	TH	H	TH	MH	MS	MH	MS	MS
1972	H	MH	MH	H	H	H	MS	MH	H	H
1973	MS	H	MH	MS	TH	TH	MH	MS	H	MH
1974	MS	MS	MH	MS	H	MH	S	S	MH	MS
1975	MH	MH	H	MH	TH	MH	S	S	MH	MS
1976	MS	S	MH	MS	TH	MH	MH	MS	MH	MH
1977	MH	TH	MS	S	MH	MS	MS	S	S	H
1978	S	MS	MS	S	MH	MH	MS	MS	MS	TS
1979	S	MH	MH	MS	H	MH	MH	MH	MS	MH
1980	S	MH	MH	MH	H	MH	MS	MH	MH	MH

1981	TS	S	S	MS	MS	S	MS	MS	S	S
1982	S	S	MS	MH	MS	H	TH	H	H	MH
1983	S	S	S	S	S	S	MS	S	TS	TS
1984	MS	S	MH	H	MS	H	TH	TH	H	MH
1985	MH	MS	S	MS	S	MH	MS	MS	MH	MH
1986	MH	MH	MH	H	MH	MH	H	MH	MH	MH
1987	MS	MS	MS	S	MS	MS	MS	MH	MS	MH
1988	MS	MS	MS	MS	S	MS	MS	MS	S	MS
1989	MS	MS	MS	S	MS	S	MS	S	S	MS
1990	MH	H	H	MS	MS	S	MS	H	MS	S
1991	MH	MH	MS	MH	MS	S	MS	MS	MS	MS
1992	MS	MS	MS	MS	MS	MH	MH	MH	MH	MS
1993	MS	S	MS							
1994	MS	S	S	S	MS	S	S	MS	S	MH
1995	MH	MS	MH	MS	MS	MS	MS	MS	MS	S
1996	MS	MH	MS	H	MS	MH	MH	MH	MH	H
1997	MS	MS	MS	MH	MS	MS	H	MH	MS	MS
1998	MS	S	S	MS	MS	MS	MH	MH	MH	H
1999	MH	MS	MH							
2000	MH	MS	S	MH	S	S	S	S	TS	S
2001	TH	H	H	H	S	S	S	MS	MS	MS
2002	MS	MS	S	MS	MS	MS	MS	MH	H	MH
2003	MH	H	H							
2004	MH	MH	MH	MH	MH	MH	H	H	MH	MH
2005	MS	MS	MS	MS	S	MS	MH	H	MH	MH
2006	MH	MS	MS	TH	MS	MS	MS	MS	MS	MS
2007	TH	H	H	H	MS	MH	MH	MS	H	H
2008	MH	MH	MH	MH	MH	MS	S	MS	MS	MS
2009	MS	MS	MS	S	MS	MS	H	TH	H	MH
2010	MH	MH	MH	MH	MS	MS	MS	MH	MS	MH
2011	MH	MS	MH							
2012	MH	H	MH	H	MS	H	MS	MS	MH	H
2013	TH	H	H	H	MH	H	MH	H	MH	H
2014	MS	MS	MS	H	MS	MS	MH	S	MS	MS

TH : très humide, H : humide, MH : modérément humide, MS : modérément sèche, S : sèche, TS : très sèche.

En suivant l'évolution de l'indice *SPI* durant la période étudiée, nous avons pu estimer qu'en terme de fréquence cette méthode indique un pourcentage moyen de 54 % d'années sèches dont 2 % représente une sécheresse extrêmement élevée, contre 46 % d'années humides (**Tableau III-14**), les périodes déficitaires sont plus étendues dans l'espace et plus persistantes dans le temps que les périodes excédentaires.

Tableau III.14 : Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI) sur le littoral Algérien

SPI \ Stations	TH (> 2)	H (1 à 2)	MH (0 à 1)	MS (-1 à 0)	S (-2 à -1)	TS (< - 2)
Arzew	7%	2%	38%	38%	13%	2%
Ghazaouet	2%	16%	31%	36%	16%	0
Oran	2%	11%	36%	33%	18%	0
Mostaganem	2%	22%	29%	29%	10%	0
Tlemcen	9%	9%	20%	49%	13%	0
Alger	2%	11%	38%	31%	18%	0
Annaba	4%	9%	29%	42%	16%	0
Skikda	4%	11%	31%	38%	16%	0
Bejaia	0%	18%	29%	36%	13%	4%
Jijel	0%	18%	38%	31%	9%	4%
Moyenne	2%	13%	31%	36%	16%	2%

TH : très humide, H : humide, MH : modérément humide, MS : modérément sèche, S : sèche, TS : très sèche.

En conclusion, sur la zone d'étude, il indique une situation majoritairement dominée par la sécheresse.

Les figures suivantes montrent les résultats obtenus de l'Indice Standardisé de précipitation pour chaque station étudiée.

III.4.2.3.a Station d'Arzew

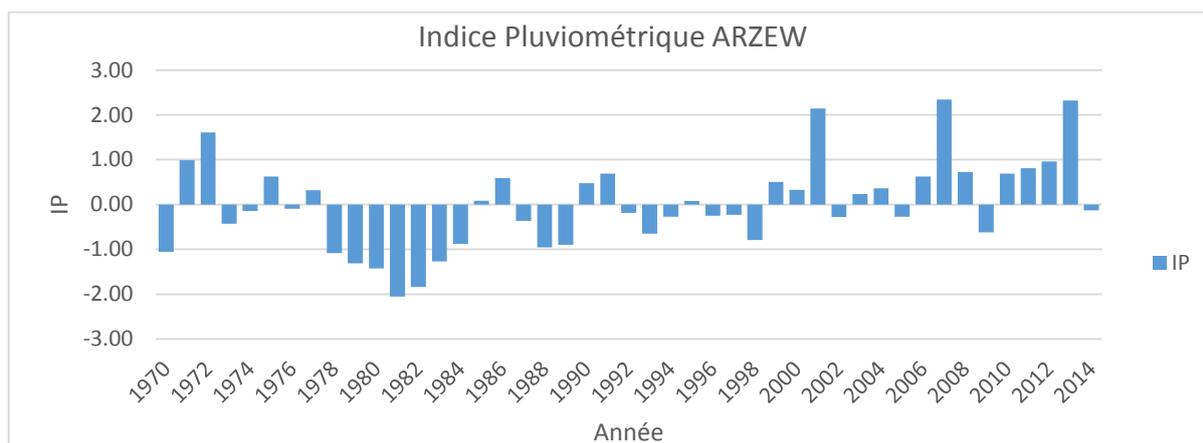


Figure III.10.a : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station d'Arzew (1970 -2014)

Cette station a connu une forte variabilité interannuelle des précipitations avec une succession de périodes déficitaires, la première entre 1978-1984, la seconde entre 1987-1989, la dernière entre 1992-1998 et une période humide se situant entre 2001-2014 avec de légers déficits en 2002, 2005, 2009 et 2014 (**Figure III.10.a**).

III.4.2.3.b Station de Ghazaouet

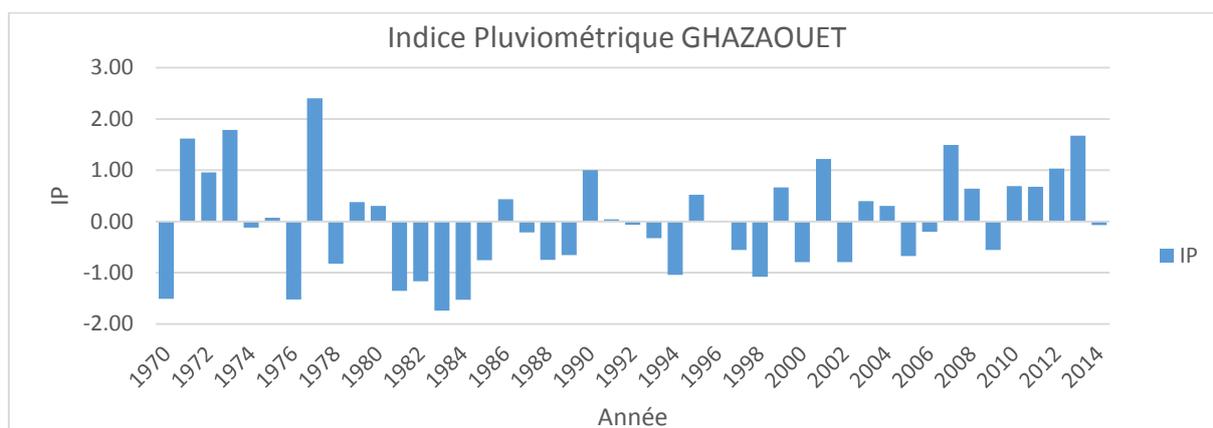


Figure III.10.b : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Ghazaouet (1970 -2014)

La pluviométrie à Ghazaouet est marquée par des fluctuations interannuelles très remarquables avec une succession de périodes sèches et de périodes humides (**Figure III.10.b**). Les périodes 1971-1975 et 2010-2014 ont été humides avec de légers déficits respectivement en 1974 et 2014 tandis qu'une longue période sèche s'observe nettement à partir de 1979 jusqu'aux années 90.

III.4.2.3.c Station d'Oran

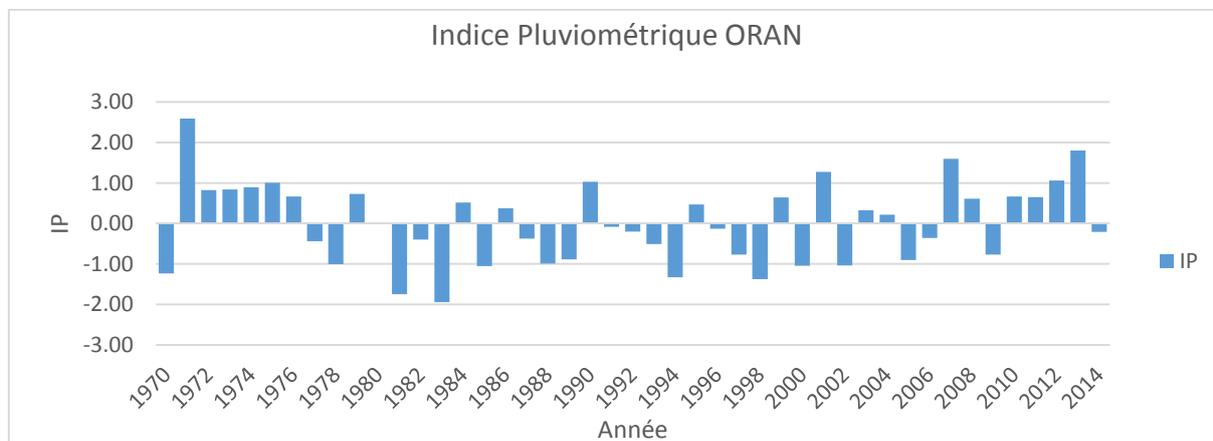


Figure III.10.c : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station d'Oran (1970 - 2014)

Les précipitations à Oran ont connu d'importantes variations interannuelles avec plusieurs périodes déficitaires notamment de 1981 à 1984, entre 1987-1989, de 1991 à 1994, et de 1996 à 1998 (**Figure III.10.c**). Les périodes 1972-1976, et 2007-2014 ont été humides avec de légers déficits en 2009 et 2014.

III.4.2.3.d Station de Mostaganem

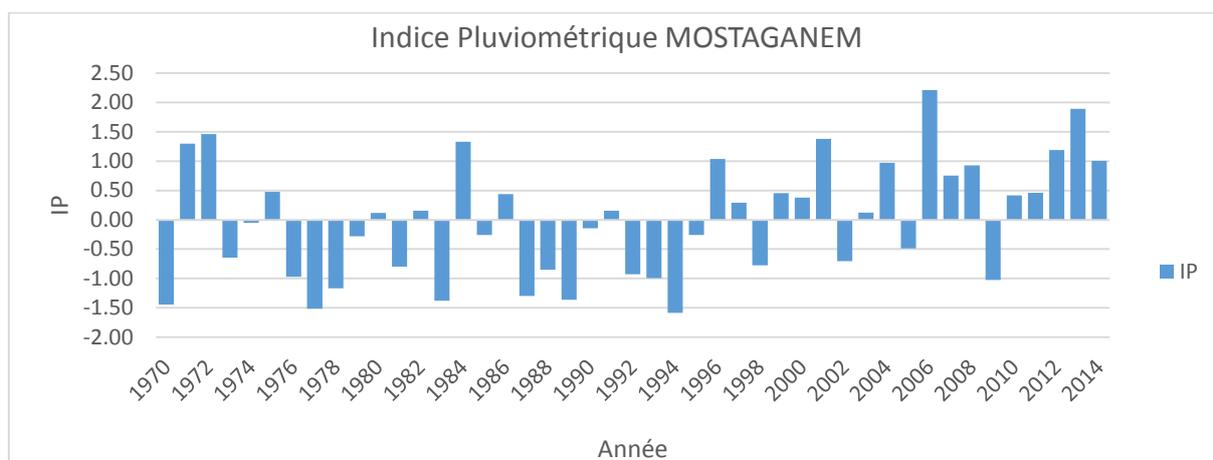


Figure III 10.d : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Mostaganem (1970 -2014)

A Mostaganem, les variations interannuelles des précipitations sont assez importantes. La station a connu deux périodes sèches : une première s'étendant de 1973 à 1983, une seconde de 1985 à 1995 (**Figure III.10.d**). Les autres périodes de la chronique ont été humides sauf pour les années 1970, 1998, 2002, 2005 et 2009 qui ont connu un important déficit.

III.4.2.3.e Station de Tlemcen

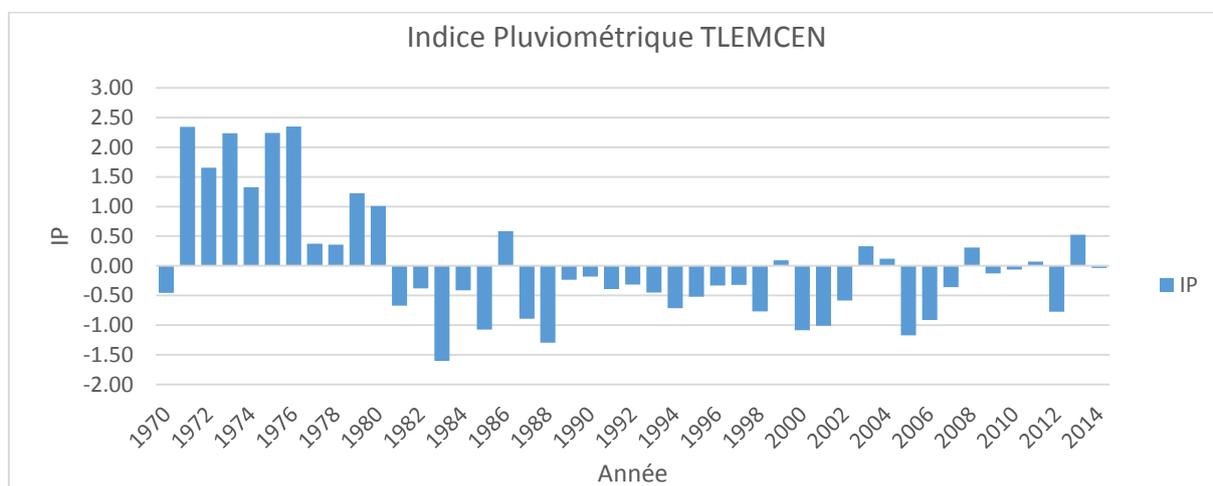


Figure III.10.e : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Tlemcen (1970 -2014)

La station de Tlemcen connaît également des fluctuations interannuelles mais surtout un déficit pluviométrique à partir des années 80 qui persiste jusqu'en 2014 (**Figure III.10.e**). La période 1972-1980 a été très humide.

III.4.2.3.f Station d'Alger

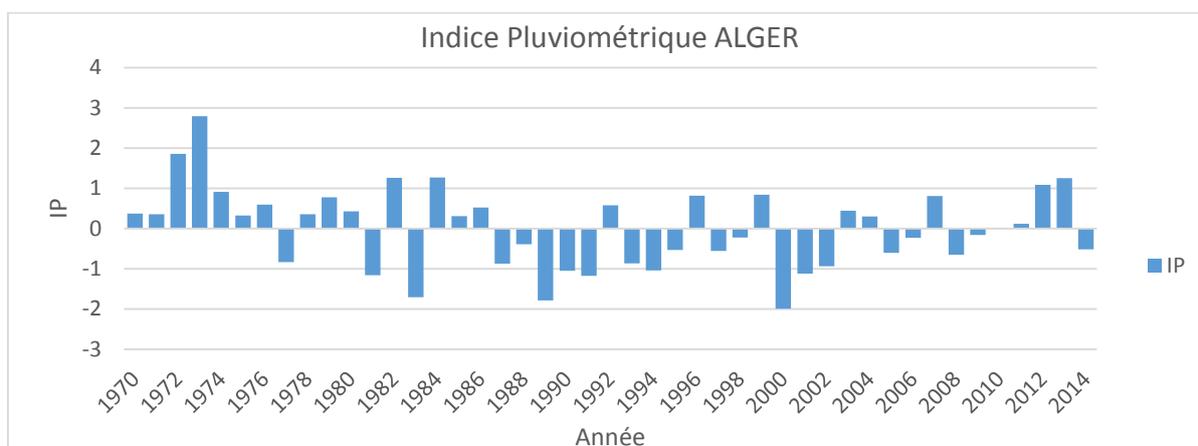


Figure III.10.f : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station d'Alger (1970 - 2014)

Egalement marquée par de fortes fluctuations interannuelles, la station d'Alger a connu une période humide de 1970 à 1976, et observe une très longue période sèche s'étendant de 1987 à 2002 (**Figure III.10.f**).

III.4.2.3.g Station d'Annaba

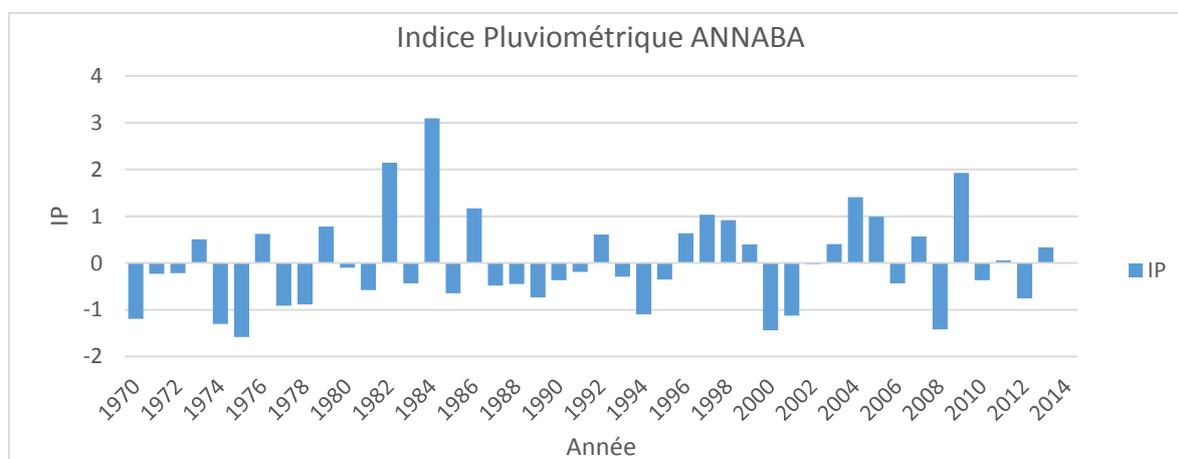


Figure III.10.g : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station d'Annaba (1970 -2014)

Les précipitations à Annaba ont connu d'importantes variations interannuelles avec des périodes déficitaires assez importantes notamment de 1970 à 1981, entre 1987-1995, et de 2000 à 2002 (**Figure III.10g**). Les périodes 1995-1998 et 2003-2007 ont été humides.

III.4.2.3.h Station de Skikda

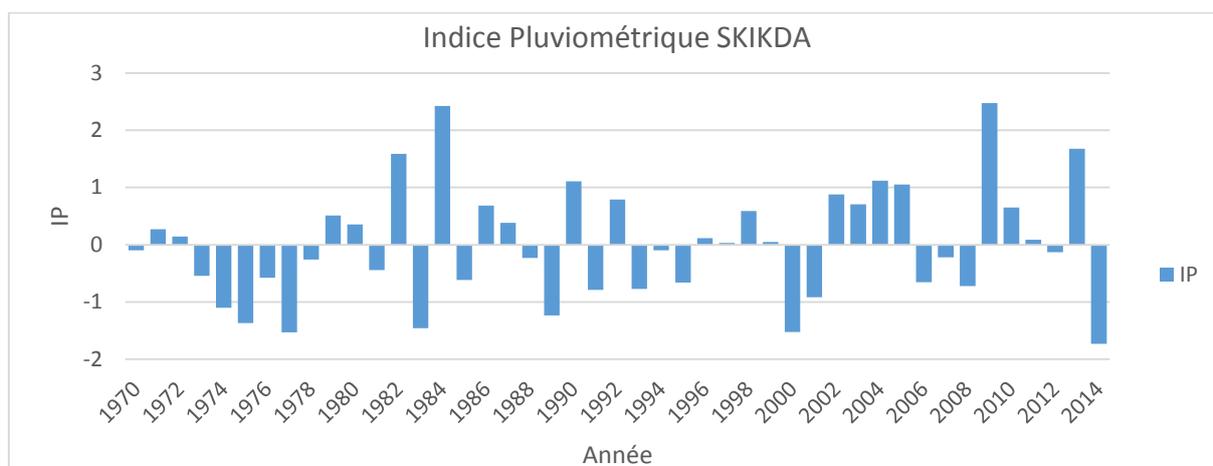


Figure III.10.h : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Skikda (1970 -2014)

La pluviométrie à Skikda est marquée par des fluctuations interannuelles remarquables avec une période sèche de 1970 à 1978 et une période humide de 2002 à 2005 (**Figure III.10.h**).

III.4.2.3.i Station de Bejaia

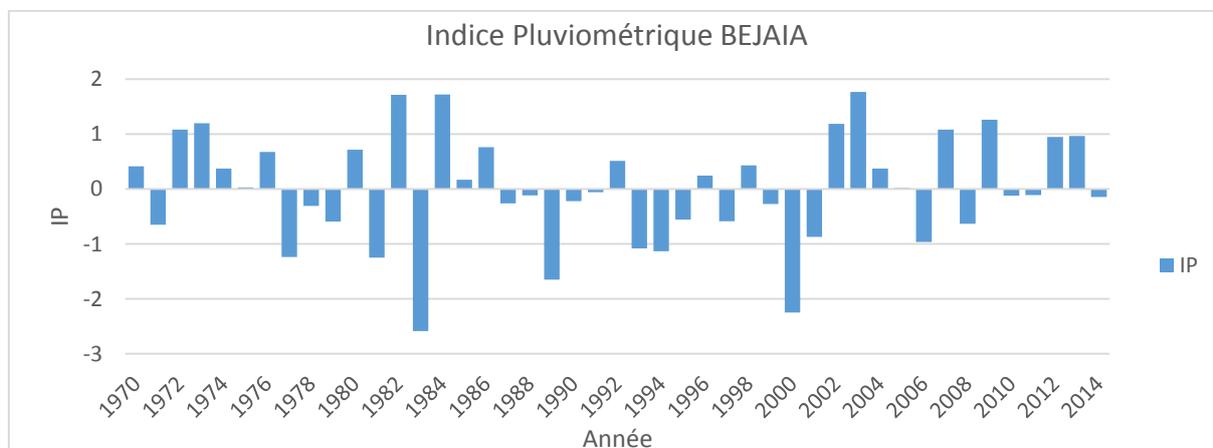


Figure III.10.i : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Bejaia (1970 -2014)

Cette station a connu une forte variabilité interannuelle des précipitations avec une succession de périodes sèches et de périodes humides (**Figure III.10.i**). Les périodes 1972-1976, 1984-1986, et 2002 à 2005 ont été humides avec de légers déficits en 2010,2011 et 2014 tandis que les périodes 1977-1979, 1978-1991, 1993-1995 et 1999 à 2001 ont été sèches.

III.4.2.3.j Station de Jijel

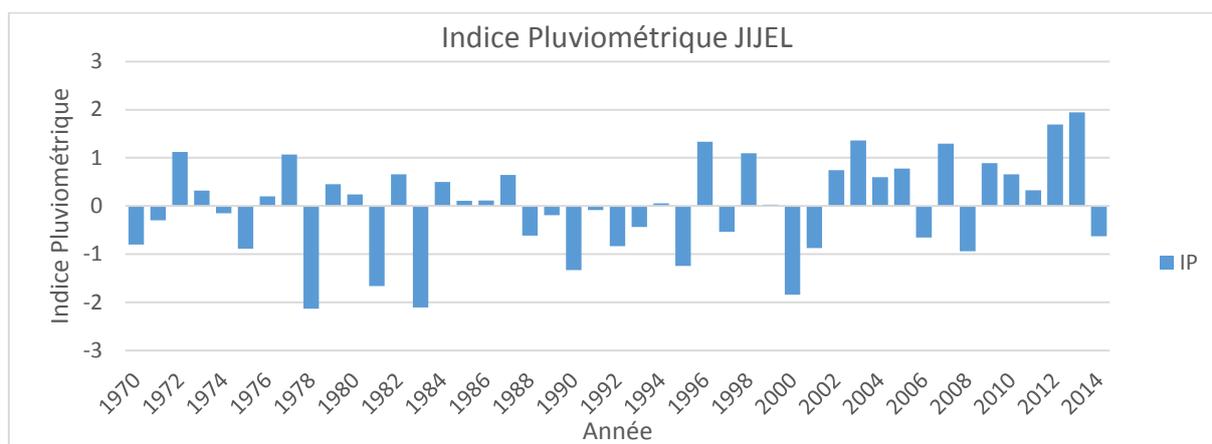
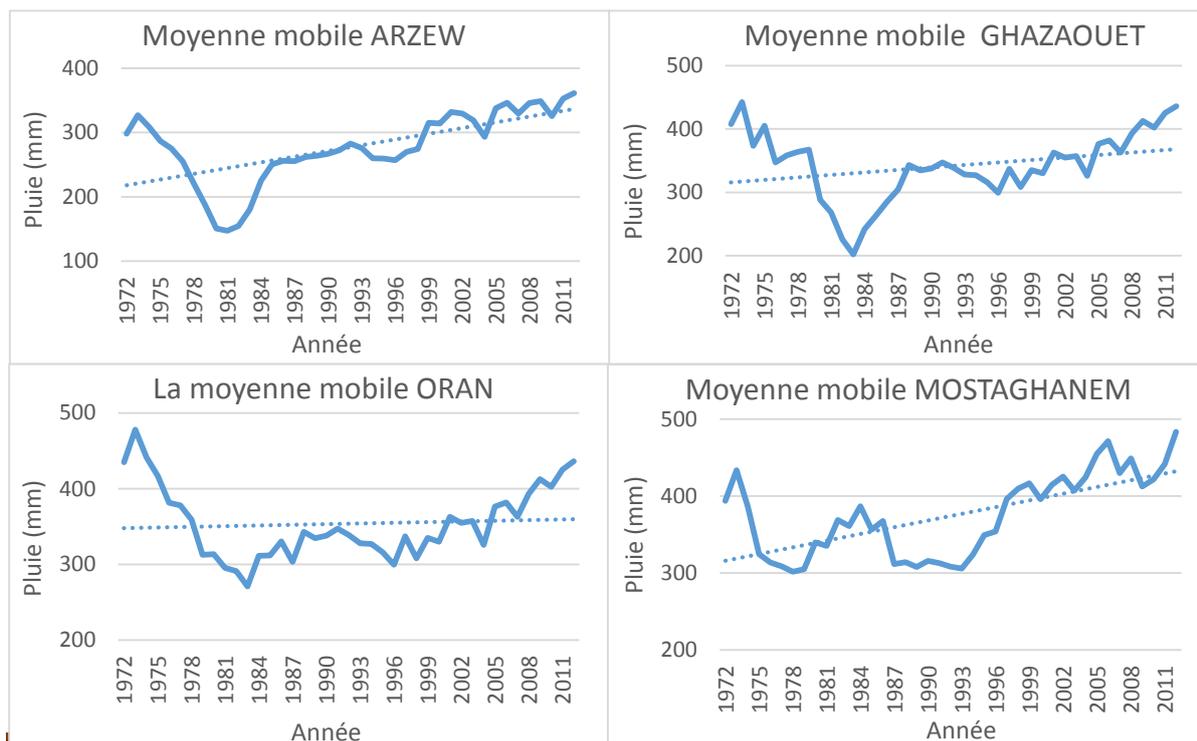


Figure III.10.j : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Jijel (1970 -2014)

A Jijel, les variations interannuelles des précipitations sont assez importantes. La station a connu deux périodes sèches : la première s'étendant de 1988 à 1995 et la seconde de 1999 à 2001 (**Figure III.10.j**). Les autres périodes de la chronique ont été humides sauf pour les années 1970-1971, 1975, 1978, 1981 et 2008 qui ont connu un important déficit.

III.4.2.4 Moyenne Mobile (M_m)

Dans première temps nous avons adopté la moyenne mobile d'ordre 5 lissée par une courbe de tendance linéaire pour obtenir une vue d'ensemble sur les variations du régime pluviométrique sur les 10 stations en question. La **figure III.11** illustre les résultats de d'application de cette méthode.



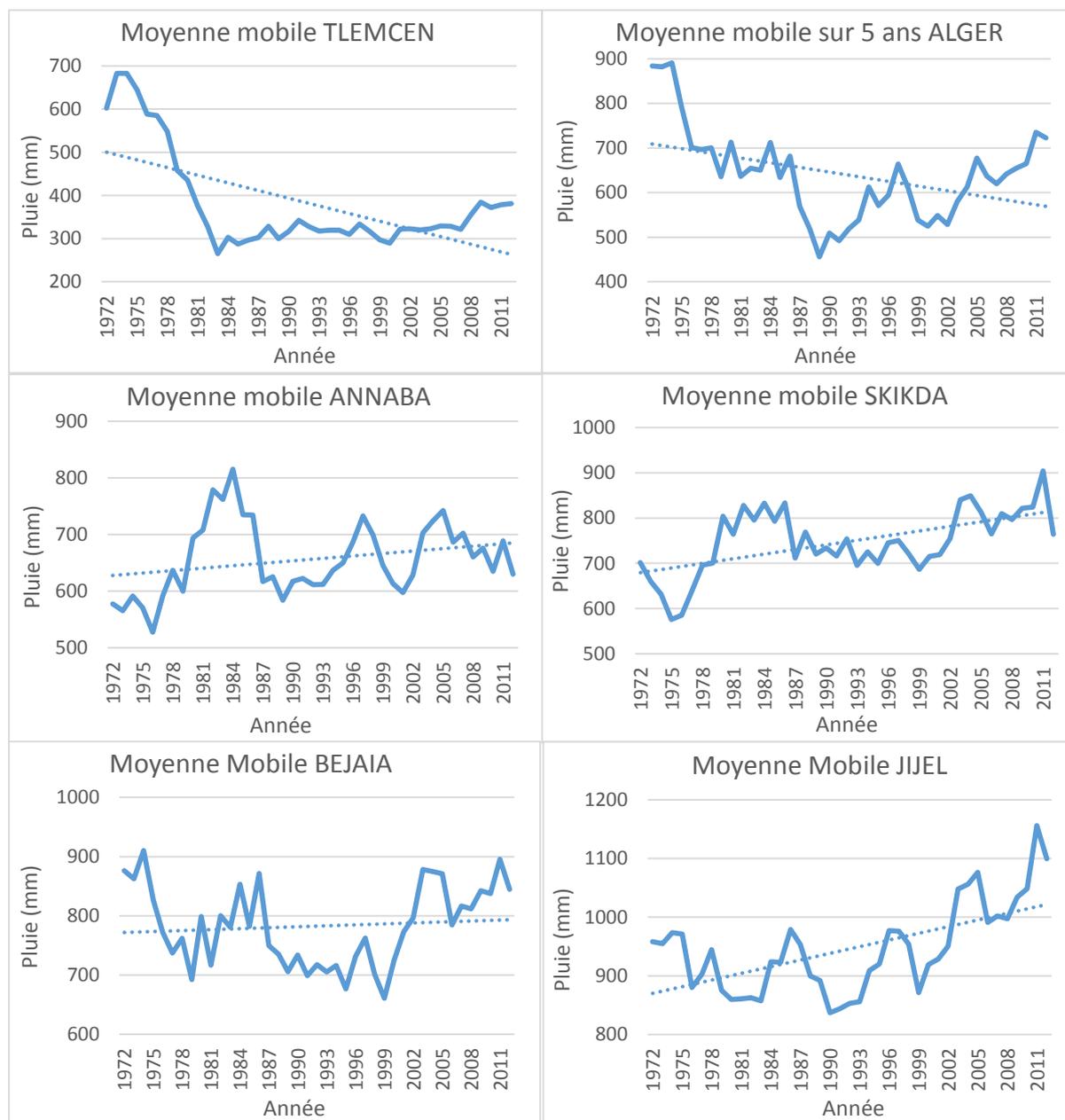


Figure III.11 : Moyenne mobile d'ordres 5 et courbes de tendance

La **figure III.11** de la moyenne mobile d'ordre 5 et la courbe de tendance jointe nous montre une aptitude à la hausse des précipitations sur la zone d'étude pour toutes les stations, excepté pour celles de Tlemcen et d'Alger. Nous remarquons aussi que pour les stations en hausse une homogénéité à l'échelle régionale. Pour les stations de l'Ouest la sécheresse s'est intensifiée lors des années 80 tandis que pour la région Est, la sécheresse s'est montrée persistante lors des années 90.

III.5 Conclusion

L'analyse du régime pluviométrique par les paramètres statistiques a permis de mettre en évidence des variations spatio-temporelles, de cibler avec exactitude les périodes où la sécheresse s'est montrée sévère et la tendance à la hausse depuis l'année 2002.

Cette étude nous a permis également de conclure que le régime pluviométrique n'est pas uniformément réparti sur le littoral Algérien. En effet, la région de l'Est, est plus arrosée par les précipitations, alors que la région de l'Ouest est la plus déficitaire.

La période allant de 1980-1993 était très déficitaire et touchée par une sécheresse persistante, plus précisément les années 1981, 1983, 1988, 1989 et 1993.

La majorité des années communes très humides se situent entre 2002 et 2013, les apports pluviométriques durant cette période sont considérablement importants.

En général, comme l'étude par les indices de sécheresse l'a montré, le nombre des années sèches et humides est équilibré avec une légère tendance à la sécheresse, la succession d'années sèches durant les années 80 et 90 a fait la différence avec des années dont la pluviométrie est visiblement faible, mais depuis cette période les signes de sécheresse sont peu ressentis.

Chapitre IV

Traitement des
données

pluviométriques par
les tests statistiques

IV.1 Introduction

La caractérisation d'éventuelles fluctuations d'ordre climatique d'une région repose entre autres analyses sur l'étude de séries chronologiques de données de pluie à différents sites de mesures, les plus nombreux possibles, sur des périodes les plus longues possibles.

Les variations au sens le plus général du terme qui seront éventuellement décelées ne seront pas systématiquement qualifiées de climatiques. Une interprétation prudente des résultats devra être donnée, et ce d'autant plus que les séries étudiées seront de courte durée.

Les méthodes statistiques dont il est fait état dans ce chapitre concernent l'exploitation d'une série de données et une seule. Ce type d'analyse sera qualifié de ponctuel ou "par site".

Nous commencerons ce chapitre par une synthèse bibliographique pour exposer les travaux qui ont abouti à ces tests, par la suite nous présenterons ces tests et enfin nous appliquerons les tests retenus aux données pluviométriques des dix (10) stations du littoral Algérien au pas de temps annuel, à l'aide d'un Logiciel développé par les chercheurs de l'UMR HydroScience Montpellier nommé **KHRONOSTAT IRD 2002** dans sa dernière version 1.01 qui permet d'analyser les séries de données et visualiser leurs résultats sous forme d'hypothèses ainsi que d'interfaces graphiques.

IV.2 Synthèse bibliographique

La littérature consacrée à l'approche statistique de séries chronologiques de variables hydrométéorologiques est particulièrement abondante.

D'après Kendall et Stuart (1943), l'analyse d'une série temporelle a pour but d'améliorer la compréhension des mécanismes statistiques générateurs de cette série d'observations. Cet objectif ne peut être atteint en considérant une seule série de données. En effet toute série chronologique peut n'être qu'une représentation partielle d'un phénomène complexe générant un nombre substantiel de séries différentes.

Il n'en demeure pas moins qu'une exploitation "par site" s'impose avant de procéder à des interprétations prenant en compte la dimension spatiale des phénomènes générateurs des dites séries ponctuelles.

Tous les chercheurs s'accordent pour décomposer une série temporelle typique en quatre parties :

- une tendance
- une périodicité : oscillations plus ou moins régulières autour d'une tendance

- une autocorrélation ou un effet de mémoire : la grandeur d'une observation est dépendante de la magnitude des observations précédentes
- une composante aléatoire, non systématique, irrégulière, c'est-à-dire due au hasard

Toute série peut être représentée par l'un ou plusieurs de ces constituants.

L'étude des séries temporelles est consacrée en grande partie à isoler et à analyser séparément chacune des composantes constitutives de la série.

La décomposition d'une série est très souvent utile. Toutefois elle ne peut se faire que compte tenu d'hypothèses fortes, et a priori, concernant le caractère linéaire ou non du système générateur de ladite série chronologique. Cette phase de modélisation ne paraît pas s'imposer dans le cadre du présent travail. Elle est surtout utilisée dans le cas de variables de type économique.

Il semble préférable de lui substituer la mise en œuvre de tests statistiques, les plus robustes possibles, spécifiques de l'une ou l'autre des composantes précitées.

La première catégorie de tests concerne le caractère aléatoire des séries. Dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire des tests sont requis pour tenter de caractériser la nature "non aléatoire" présente dans la série. Les tests relatifs à la détection de point de rupture a priori à date inconnue termineront ce chapitre.

IV.2.1 Tests du caractère aléatoire des séries chronologiques

Les tests les plus répandus portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observations.

Ces tests sont en général assez puissants pour faire une distinction entre le caractère aléatoire et le caractère non aléatoire de la série. En revanche tous ne permettent pas d'identifier une alternative à la constance du type tendance, discontinuité brutale, oscillations... Seuls quelques-uns sont relativement puissants vis à vis d'une alternative spécifique, qui le plus souvent relève d'un changement brutal.

Quelques tests ont pour objet la constance de la dispersion de la série, c'est-à-dire qu'ils étudient si la variabilité de la série est uniforme dans le temps.

Les tests non paramétriques ne font pas d'hypothèse sur la nature de la distribution de probabilité de la variable définissant la série des observations. Les tests, paramétriques ou non, sont dits robustes lorsque leurs conditions d'application sont peu strictes.

Soit la série chronologique (x_i) , $i=1, N$, les x_i désignent les réalisations de la variable X observées à des pas de temps successifs égaux.

L'hypothèse nulle est donc : "la série des (x_i) , $i=1, N$, est aléatoire".

IV.2.1.1 Test du rapport de VON NEUMANN

Il s'agit du rapport de la moyenne du carré des différences successives des valeurs observées à la variance.

On note V le rapport de VON NEUMANN

$$V = \frac{N}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (x_i - x_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)^2}$$

Pour N grand ($N > 30$), si la série est aléatoire, V est distribué selon une loi normale de moyenne $\frac{2N}{N-1}$ est de variance approximativement égale à $\frac{4(N-2)}{(N-1)^2}$.

Il en résulte que si l'hypothèse nulle est vraie, la variable :

$$U = \frac{V - \frac{2N}{N-1}}{\frac{2\sqrt{N-2}}{N-1}}$$

possède une distribution normale réduite.

Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) est comprise entre :

$$(V)_t^- = \frac{2N - 2U_{1-\alpha/2}\sqrt{N-2}}{N-1} \text{ et } (V)_t^+ = \frac{2N + 2U_{1-\alpha/2}\sqrt{N-2}}{N-1}$$

Nous retenons également qu'aucune hypothèse alternative spécifique n'est associée à ce test.

IV.2.1.2 Test des changements de signe

Ce test consiste à compter le nombre de différences premières positives de la série, c'est-à-dire le nombre d'intervalles sur lesquels la série est croissante. Les intervalles où il n'y a ni croissance, ni décroissance sont ignorés.

Pour N grand ($N > 30$) sous l'hypothèse nulle, la variable c , nombre d'intervalles ou la série est croissante suit une distribution normale de moyenne $\bar{c} = \frac{N-1}{2}$ et de variance $\sigma_c^2 = \frac{N+1}{12}$.

Il en résulte que si l'hypothèse est vraie la variable $U = (c - \bar{c})/\sigma_c$ est une variable normale réduite.

Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre :

$$\bar{c} - U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_c \text{ et } \bar{c} + U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_c$$

Ce test a été principalement présenté comme un test dont l'hypothèse alternative est celle d'une tendance spécifiquement linéaire.

IV.2.1.3 Test de corrélation sur le rang

Ce test apparaît comme une amélioration apportée au test précédent. En effet, il se propose de calculer le nombre de paires P pour lesquelles $x_i > x_j, i < j$, avec $i = 1, \dots, N - 1$.

Pour N grand, sous l'hypothèse nulle la variable τ telle que :

$$\tau = 1 - \frac{4Q}{N(N-1)} \text{ avec } Q = \frac{N(N-1)}{2} - P$$

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

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

Il en résulte que si l'hypothèse nulle est vraie, la variable $U = \tau/\sigma_\tau$ est une variable normale réduite.

Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre :

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

L'hypothèse alternative reconnue de ce test est celle d'une tendance.

Lorsque l'on s'intéresse directement à la distribution asymptotique de la variable P , ce test porte le nom du test de Mann-Kendall. Les deux formulations sont équivalentes.

IV.2.1.4 Test T de Student ou test de la différence de deux moyennes

Ce test paramétrique est appliqué lorsque l'on suppose qu'un changement brutal est intervenu dans la série de telle sorte que celle-ci peut être découpée en deux sous-séries de moyennes significativement différentes.

Si l'on désigne les deux moyennes en question \bar{x}_1 et \bar{x}_2 respectivement, et par N_1 et N_2 les nombres de valeurs ayant au calcul de chacune d'elles, sous l'hypothèse nulle, la variable :

$$T_a = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)}}$$

Suit une distribution **T** de Student à $N_1 + N_2 - 2$ degrés de liberté. S_1^2 et S_2^2 sont respectivement les variances estimées des deux sous-séries, les variances théoriques étant supposées égales.

Ce test est robuste car il peut être appliqué à des données indépendamment de la nature de leur distribution de probabilité à cause du théorème Central Limite.

Il se révèle performant pour détecter une tendance, et s'avère impuissant vis-à-vis de toute autre alternative.

IV.2.1.5 Test de Cramer

Ce test compare les moyennes des sous-séries avec la moyenne de la série totale. Il vérifie que la différence des moyennes est compatible avec l'hypothèse nulle de comportement aléatoire de la série.

On désigne par \bar{x} et s respectivement la moyenne et l'écart-type de la série totale.

\bar{x}_k est défini comme la moyenne de la sous-période de n valeurs, comparée à \bar{x} :

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=k+1}^{k+n} x_i}{n}$$

Si l'on définit :

$$\tau_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{x})}{s}$$

La variable :

$$T_k = \left[\frac{n(N-2)}{N-n(1+\tau_k)} \right]^{1/2} \tau_k$$

suit une distribution de Student à $N-2$ degrés de liberté.

Pour un risque α de première espèce donné, et N grand ($N > 30$), la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre les valeurs théoriques de la variable de Student de probabilité de non-dépassement respectivement égale à $\alpha/2$ et $1 - \alpha/2$.

IV.2.1.6 Test de l'Autocorrélogramme

Une autre mesure du caractère aléatoire d'une série chronologique est donnée par le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1, et plus généralement par l'autocorrélogramme. En effet on suppose qu'il existe des dépendances significatives entre les termes successifs d'une série non aléatoire.

Le coefficient d'autocorrélation d'ordre k est donné par l'expression :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+k} - \bar{x}_2)}{\sqrt{[\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x}_1)^2 \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k} - \bar{x}_2)^2]}}$$

Avec \bar{x}_1 moyenne des observations $(x_i), i = 1, N - k$, et \bar{x}_2 moyenne des observations $(x_i), i = k + 1, N$.

D'après Chatfield (1989), si une série chronologique est aléatoire, alors pour N grand, $r_k \approx 0$ pour toute valeur de k non nulle. En fait pour une série chronologique aléatoire, et pour N grand, r_k suit approximativement une distribution normale de moyenne nulle et de variance $1/N$.

Il est donc possible de définir une région de confiance contenant pour un seuil de confiance donné, sous l'hypothèse nulle, l'autocorrélogramme. Pour un seuil de confiance $1 - \alpha/2$ donné, la région de confiance est définie par $\pm \frac{U_{1-\alpha/2}}{\sqrt{N}}$. U désigne la variable normale réduite.

Une importance particulière doit être donnée au comportement de l'autocorrélogramme pour de faibles valeurs de k , notamment pour $k = 1$. En effet sur les vingt premières valeurs de r_k , il n'est pas rare qu'une valeur sorte de la région de confiance même lorsque la série est réellement aléatoire. Ceci souligne les difficultés d'interprétation de

l'autocorrélogramme, indépendamment des conditions d'application relatives à la linéarité des liaisons, et à la structure des écarts à ces liaisons.

IV.2.2 Tests de détection des ruptures

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées.

Le choix des méthodes retenues repose sur la robustesse de leur fondement et sur les conclusions d'une étude de simulation de séries aléatoires artificiellement perturbées.

Elles permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série: A l'exception de l'approche de Pettitt, elles supposent un non-changement de la variance de la série étudiée. Ces méthodes ne sont pas toutes adaptées à la recherche de plusieurs ruptures dans une même série.

IV.2.2.1 Test de Pettitt (Pettitt, 1979).

L'approche de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture de 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 $(x_i)_{i=1}^t$ et $(x_i)_{i=t+1}^N$ 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 $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$; 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N - 1$.

Si K désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle la probabilité de dépassement de la valeur K est donnée approximativement par :

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

Pour un risque α de première espèce donné, si $\text{Prob}(K_N > K)$ est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée.

Si 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 $U_{t,N}$.

Ce test est fortement utilisé pour sa robustesse.

IV.2.2.2 Méthode bayésienne de Lee & Heghinian

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle.

Le modèle de base de la procédure est le suivant:

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & \text{si } i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \epsilon_i & \text{si } i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ϵ_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ; τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité *a posteriori* de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

IV.2.2.3 Statistique U de Buishand

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian.

En supposant une distribution *a priori* uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par:

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

Ou :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$$

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 des (x_i) . La variable S_k , définie au-dessus, suit une distribution normale de moyenne et de variance $k(N-k)N^{-1}\sigma^2$, $k = 0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle

d'homogénéité de la série des (x_i) . 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 .

IV.2.2.4 Procédure de segmentation d'Hubert

Une procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques a été présentée par Hubert 1989.

Le principe de cette procédure est de "découper" la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne.

La segmentation est définie de la façon suivante :

Toute série x_i , $i = i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$ ou $i_1 < i_2$ constitue un segment de la série initiale des (x_i) , $i = 1 \dots, N$.

Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation initiale d'ordre m de cette série.

A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

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

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

\bar{x}_k : La moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment, $\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{n_k}$

D_m , l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

$D_m = \sum_{k=1}^m d_k$ Avec : $d_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_k)^2$. Cet écart permet d'apprécier la proximité de la série et de la segmentation qui lui est appliquée.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante selon laquelle les moyennes de deux segments contigus

doivent être significativement différentes : $\bar{x}_k \neq \bar{x}_{k+1} \forall k = 1, 2, \dots, m - 1$. Cette contrainte est satisfaite par application du test de Scheffé qui repose sur le concept de contraste.

Par conséquent si lors du processus de segmentation d'ordre $m + 1$, aucune segmentation produite n'est valide au sens du test de Scheffé, la segmentation de la série qui est retenue en tant que meilleure segmentation est la segmentation optimale d'ordre m .

D'après Hubert, cette procédure de segmentation peut être regardée comme un test de stationnarité, "la série étudiée est stationnaire" constituant l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée. Aucun niveau de signification n'a été attribué à ce test.

IV.2.3 Synthèse des Méthodes retenues

Les divers tests qui viennent d'être présentés ne constituent en aucun cas une liste exhaustive des procédures qui ont pour objectif d'analyser "les traits" d'une série chronologique. Toutefois ont été recensés les tests les plus utilisés et les plus argumentés dans la littérature.

Parmi les méthodes présentées au paragraphe précédent, nous avons retenus pour l'étude des séries chronologiques des 10 stations du littoral Algérien, à l'aide du logiciel KHRONOSTAT, les tests suivants :

- **Test de corrélation sur le rang**

Ce test est intéressant du point de vue de son hypothèse alternative qui est celle d'une tendance. De plus ce test s'est révélé satisfaisant pour détecter un changement de moyenne sur des séries aléatoires générées artificiellement avec perturbations (Bonnaud, 1994). En outre, il ne suppose aucune propriété particulière de la série chronologique étudiée.

- **Détermination de l'autocorrélogramme**

L'estimation de l'autocorrélogramme est incontournable comme première exploitation de toute série chronologique.

- **Test de Pettitt (Pettitt, 1979)**

La réputation de ce test de détection de rupture dont il existe de multiples applications justifie qu'il soit ici retenu. Il s'applique à des séries non autocorrélées et requiert implicitement que la variance de la série ne soit pas affectée par la rupture.

- **Statistique U de Buishand**

La robustesse de ce test et l'originalité de son fondement à partir d'une approche Bayésienne le rendent intéressant.

- **Ellipse de Contrôle**

L'ellipse de contrôle est un complément graphique original au test de Buishand.

- **Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian**

La procédure Bayésienne de Lee et Heghinian a été déjà appliquée à l'étude de la structure des séries de pluies (Chaouche, 1988) et a donné de très bons résultats. Il semble donc tout à fait justifié de la mettre en œuvre dans le cadre de présente étude.

- **Procédure de segmentation d'Hubert**

Déjà appliquée à des séries de précipitations de l'Algérie (Meddi et al., 2003), son utilisation est fortement recommandée pour l'étude de stationnarité d'une série de données pluviométriques, c'est pour cela que nous l'avons retenue.

Parmi les raisons pour lesquelles certaines méthodes n'ont pas été retenues, il faut citer :

- l'absence d'hypothèse alternative précise ;
- l'existence de tests similaires plus performants ; c'est ainsi que les procédures de détection de rupture ont été jugées plus pertinentes que le test t de Student de différence de deux moyennes ou le test de Cramer ;
- une hypothèse trop forte de normalité de la variable étudiée, c'est-à-dire un défaut de robustesse.

IV.3 Résultats et analyses

IV.3.1 Test sur le caractère aléatoire

Nous allons utiliser les tests retenus (Test de corrélation sur le Rang et l'Autocorrélogramme) pour distinguer les caractères aléatoires et non aléatoires de chaque série chronologique.

IV.3.1.1 Test de corrélation sur le Rang

Le caractère aléatoire de chaque série chronologique constituera l'hypothèse nulle de ce test pour un seuil significatif $\alpha = 5\%$, l'hypothèse alternative est celle d'une tendance sans pouvoir identifier son type.

Les résultats ont été obtenus à l'aide du Logiciel **KHRONOSTAT** et sont donnés dans le **tableau IV.1**.

Tableau IV.1 : Valeurs des statistiques du test de corrélation sur le rang

Station	$ U $	τ	Caractère Aléatoire
Arzew	1,96	2,95	Non
Ghazaouet	1,96	1,97	Non
Oran	1,96	0,37	Oui
Mostaganem	1,96	2,6	Non
Tlemcen	1,96	- 2,03	Non
Alger	1,96	- 1,01	Oui
Annaba	1,96	1,31	Oui
Skikda	1,96	1,23	Oui
Bejaia	1,96	0,19	Oui
Jijel	1,96	1,58	Oui

Nous constatons d'après ces résultats que toutes les données des stations de la région Ouest n'ont pas de caractère aléatoire et présentent donc une tendance, excepté celle d'Oran, alors que les données des stations du Centre et de l'Est sont aléatoires.

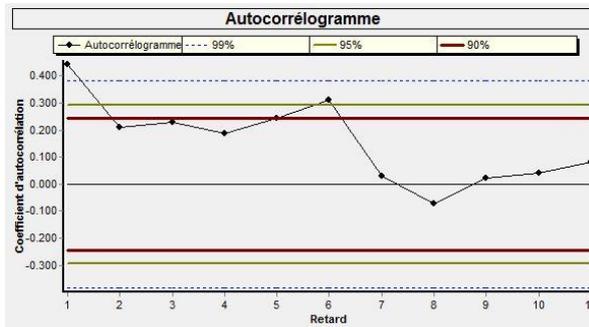
IV.3.1.2 Test de l'autocorrélogramme

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

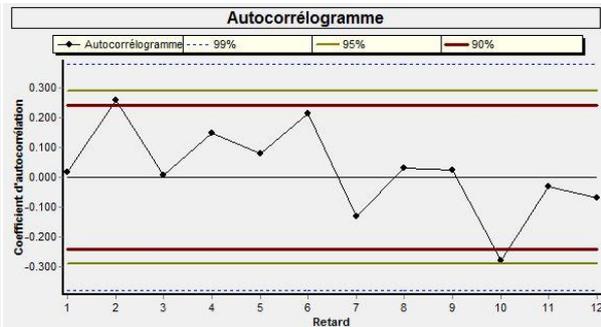
La **figure IV.1.**, montre les expressions graphiques de l'autocorrélogramme et présente la vérification du caractère aléatoire des stations retenues. Le coefficient d'autocorrélation, décroît rapidement vers la valeur nulle, donc il n'existe pas de dépendances significatives entre les termes successifs de la totalité des séries étudiées, excepté pour les stations d'Arzew, Ghazaouet, Mostaganem et Tlemcen.

Les autres séries retenues des pluies annuelles sont donc totalement aléatoires.

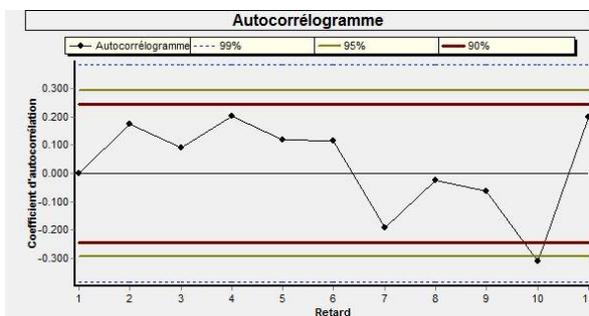
En conclusion, les deux tests employés permettent d'affirmer que les séries des précipitations annuelles utilisées sont aléatoires, hormis pour celles signalées. La succession des pluies dans le temps semble ne présenter aucune organisation précise.



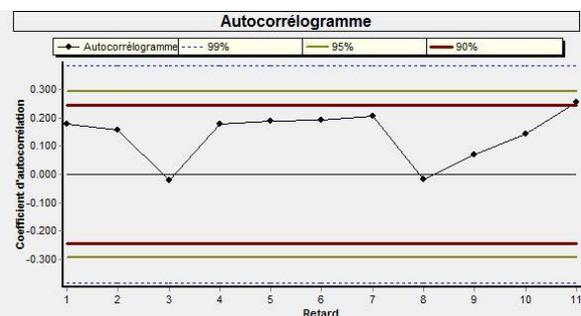
Autocorrélogramme-Arzew



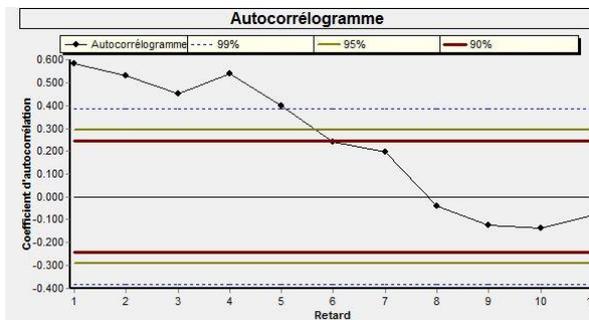
Autocorrélogramme-Ghazaouet



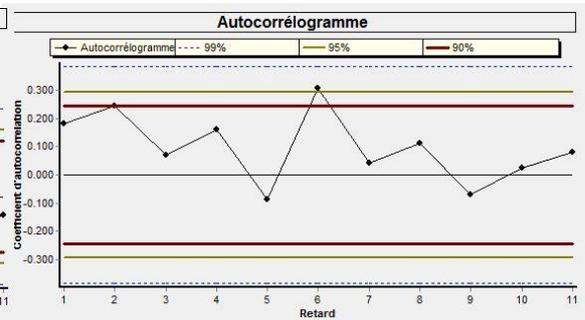
Autocorrélogramme-Oran



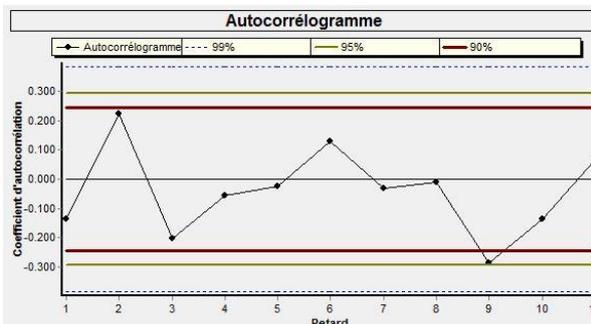
Autocorrélogramme-Mostaganem



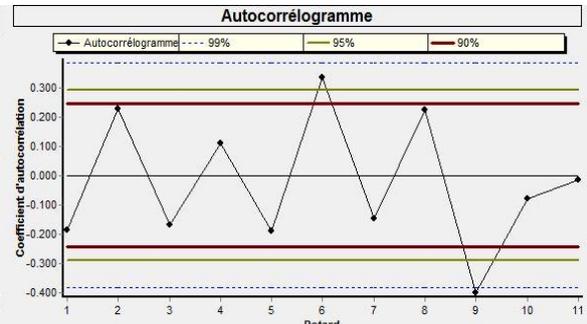
Autocorrélogramme-Tlemcen



Autocorrélogramme-Alger



Autocorrélogramme-Annaba



Autocorrélogramme-Skikda

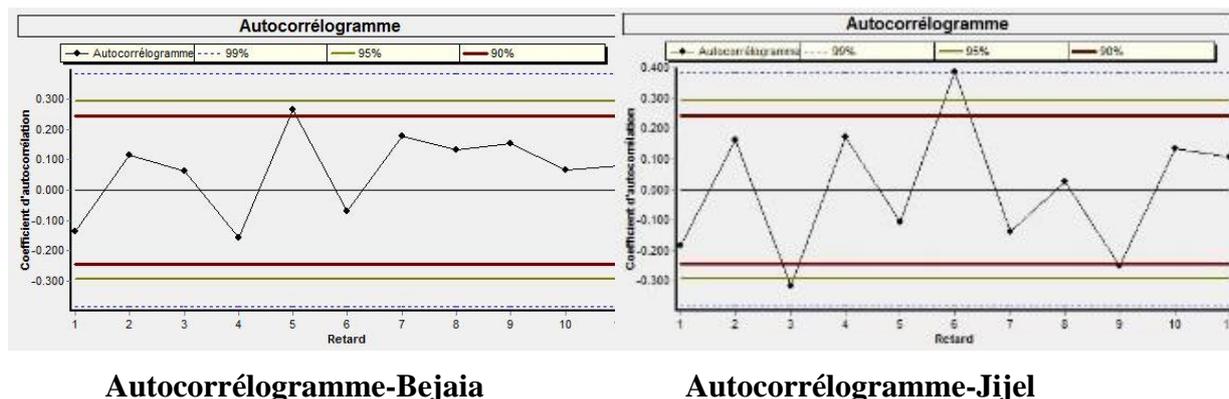


Figure IV.1 : L'Autocorréogramme et ses intervalles de confiance (90%, 95% et 99%) des stations

Analysons les tendances générales de l'évolution des pluies annuelles sur la période 1970-2014 pour les différentes stations.

IV.3.2 Tests de détection des ruptures

Nous avons appliqué les différents tests pour la détection des ruptures ainsi que l'année correspondante à la rupture si elle a eu lieu. Les tests de Pettitt, Buishand, Lee et Heghinian ne détectent qu'une seule rupture dans les séries chronologiques, la segmentation d'Hubert peut détecter plusieurs changements de la moyenne.

IV.3.2.1 Tests de Pettitt (Pettitt 1979), Lee & Heghinian et Segmentation d'Hubert

La variable analysée est le cumul pluviométrique sur une année civile.

Les résultats du test de **Pettitt** confirment les résultats précédents des tests de vérification du caractère aléatoire. En effet, 3 stations sur les 10 choisies ont une rupture au seuil de confiance de 95% avec des dates de rupture comprises entre 1980 et 1998. Les ruptures décelées correspondent à une hausse significative de la moyenne des précipitations après ces dates pour les stations d'Arzew (+33%) et Mostaganem (+28%) et une baisse encore plus significative pour la station de Tlemcen (- 44%) (**Tableau IV.2**).

Les ruptures décelées par le test de **Lee & Heghinian** se rapprochent dans la majorité des cas de celles détectées par le test de **Pettitt**.

Tableau IV.2 : Résultats des tests statistiques et calcul des variations pour la moyenne des pluies annuelles

Stations	Rang	Pettitt		Lee & Heghinian	
	Tendance	Rupture	Variation (%)	Rupture	Variation (%)
Arzew	Non Aléa	1998	+33	1998	+33
Ghazaouet	Non Aléa	/	/	2006	+25

Oran	Aléa	/	/	1976	-21
Mostaganem	Non Aléa	1995	+28	1995	+28
Tlemcen	Non Aléa	1980	-44	1980	-44
Alger	Aléa	/	/	1976	-27
Annaba	Aléa	/	/	1978	+19
Skikda	Aléa	/	/	2013	-1
Bejaia	Aléa	/	/	2011	+13
Jijel	Aléa	/	/	2011	+21

Le test de Lee & Heghinian a l'avantage de détecter des ruptures qui se présentent même à l'extrémité des séries temporelles, même si parfois, il peut induire l'hydrologue en erreur en détectant des ruptures insignifiantes.

Nous constatons que pour les stations d'Arzew, Mostaganem et Tlemcen, le test de Lee & Heghinian détecte les mêmes années de rupture. De plus il détecte d'autres années de rupture pour toutes les autres stations et plus particulièrement l'année 1976 pour les stations d'Alger et d'Oran avec des déficits respectifs significatifs de 27 et de 21% de la moyenne interannuelle.

D'autres années de rupture sont détectées par ce test et se situent aux extrémités des séries temporelles de chaque station mais avec des variations nettement insignifiantes.

Pour corroborer ces résultats nous avons fait appel à un autre test celui de la segmentation d'Hubert.

Tableau IV.3 : Résultat de la segmentation d'Hubert

Station	Début	Fin	Moyenne (mm)	Ecart-Type (mm)
Arzew	1970	1977	301.2	71.7
	1978	1984	161.9	35
	1985	2014	304.7	73.4
Ghazaouet	1970	1980	382.9	144
	1981	1985	202.1	41.7
	1986	2014	365.3	91.1
Oran	1970	2014	359.6	96.1
Mostaganem	1970	1995	338.9	93.6
	1996	2014	438.1	90.4
Tlemcen	1970	1970	320.9	0
	1971	1976	692.7	64.3
	1977	1980	500.3	66.2
	1981	2014	324.8	78.7
Alger	1970	1976	850.4	169.2
	1977	2014	614.8	167.1
Annaba	1970	2014	652.2	153.5
Skikda	1970	2014	745.9	166.3

Bejaia	1970	2014	789.1	180.9
Jijel	1970	2001	903.8	174.6
	2002	2014	1066	167.5

Les résultats montrent que la segmentation d'Hubert est une méthode plus généralisée, elle considère tout changement de la moyenne comme étant une rupture.

On remarque aussi que ces changements de moyenne peuvent coïncider avec les ruptures détectées en grande partie par les tests de **Pettitt** et **Lee & Heghinian**.

IV.3.2. Test de Buishand et l'Ellipse de Contrôle Associée

Le test de Buishand a pour hypothèse nulle ; l'absence de rupture dans les séries chronologiques des données, l'hypothèse alternative est la présence d'un changement brutale dans la moyenne, autrement dit une rupture très significative.

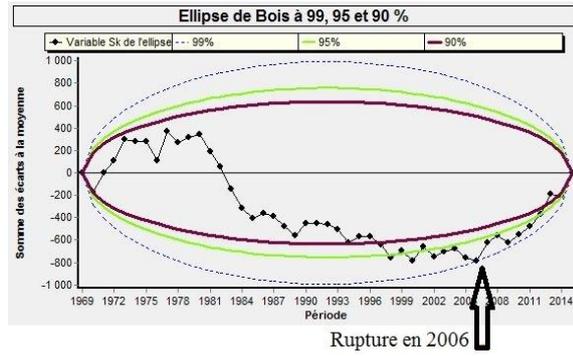
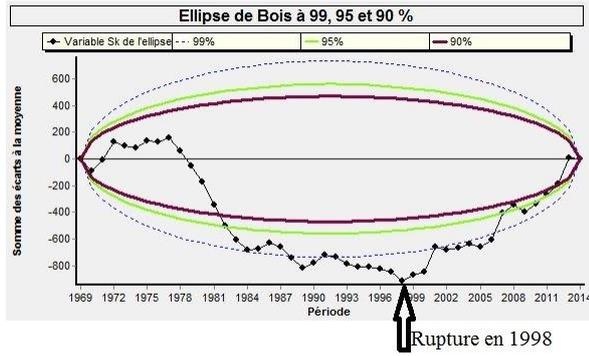
Ce test n'estime pas l'année de rupture, néanmoins l'ellipse de Contrôle permet de situer l'année de rupture, elle correspond au point le plus loin de l'ellipse en tenant compte du seuil significatif correspondant au test (dans notre cas $\alpha = 5\%$).

Un nombre admissible de point sortant de l'Ellipse est à prendre en considération c'est-à-dire qu'il se pourrait qu'un point sort de l'Ellipse mais cela ne signifie pas une rupture, c'est pour cela que l'ellipse de contrôle constitue un compliment graphique original du test de Buishand.

Le Tableau suivant illustre les résultats issus du Test de Buishand et les figures qui vont le suivre sont les ellipses de Contrôle associées à ce Test pour les dix stations.

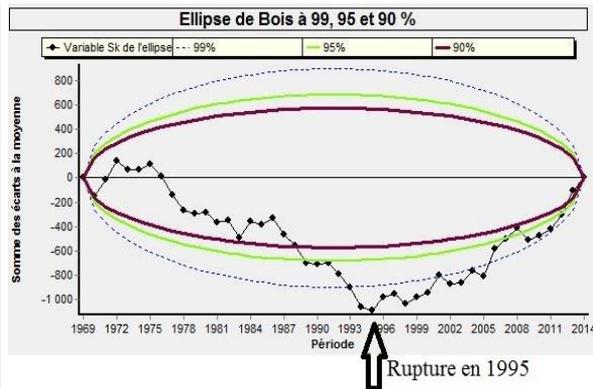
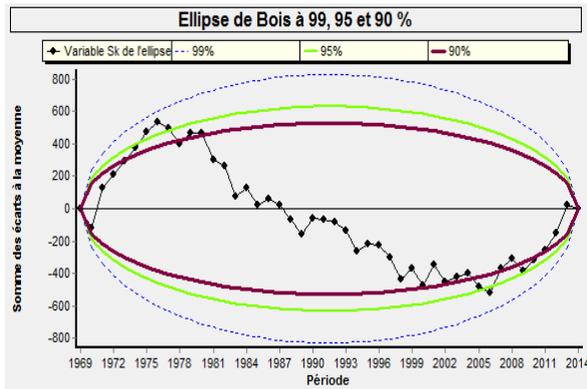
Tableau IV.4 : Résultats du Test de Buishand

Stations	Présence de rupture
Arzew	Oui
Ghazaouet	Oui
Oran	Non
Mostaganem	Oui
Tlemcen	Oui
Alger	Oui
Annaba	Non
Skikda	Non
Bejaia	Non
Jijel	Non



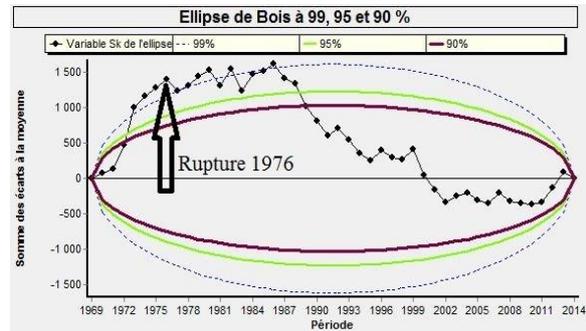
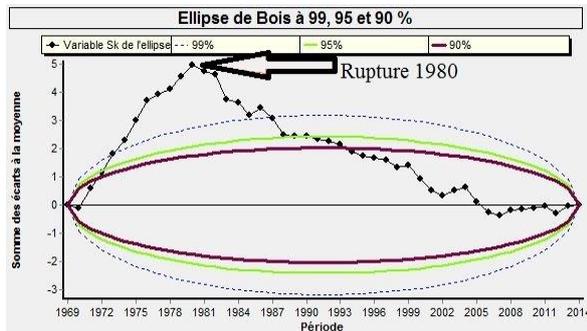
Ellipse de contrôle-Arzew

Ellipse de contrôle-Ghazaouet



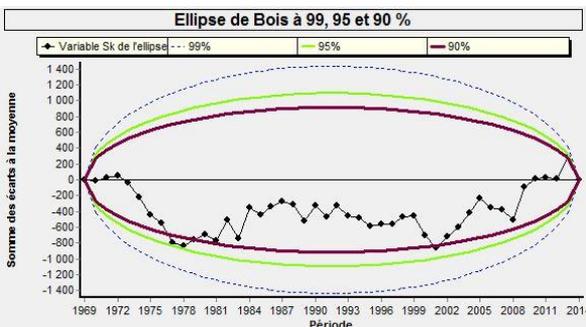
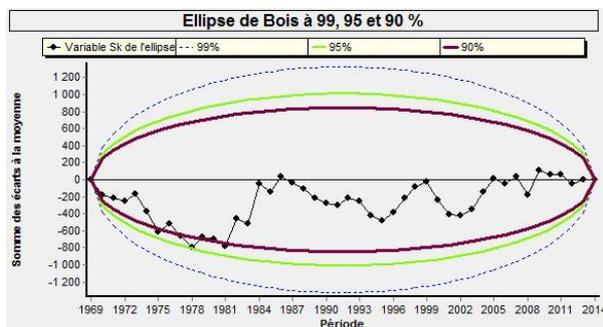
Ellipse de Contrôle-Oran

Ellipse de Contrôle-Mostaganem



Ellipse de Contrôle-Tlemcen

Ellipse de Contrôle-Alger



Ellipse de Contrôle-Annaba

Ellipse de Contrôle-Skikda

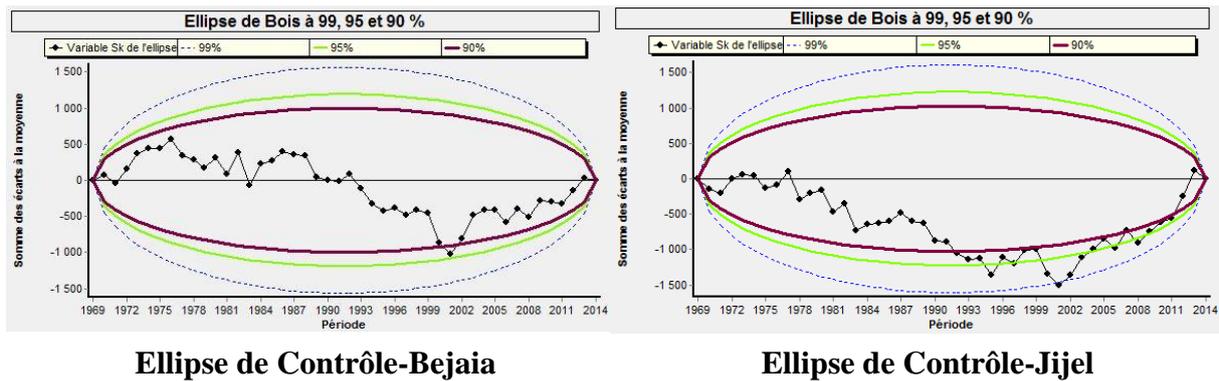


Figure IV.2 : Ellipse de Contrôle associée au test de Buishand

A l'aide du tableau de test de Buishand et l'ellipse de contrôle nous pouvons estimer les moyennes interannuelles avant et après la rupture pour les stations concernées. Les résultats de ces calculs sont donnés dans le **tableau IV.5**.

Tableau IV.5 : Détection des années de ruptures par le Test de Buishand et l'ellipse de contrôle

Stations	Présence de rupture	Année de rupture	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Variation (%)
Arzew	Oui	1998	250.3	333.5	+33
Ghazaouet	Oui	2006	330.5	413.5	+25
Oran	Non	/	/	/	/
Mostaganem	Oui	1995	338.8	433.8	+28
Tlemcen	Oui	1980	588.9	331	-44
Alger	Oui	1976	841.9	619.6	-27
Annaba	Non	/	/	/	/
Skikda	Non	/	/	/	/
Bejaia	Non	/	/	/	/
Jijel	Non	/	/	/	/

Les stations d'Arzew, Mostaganem et Tlemcen, le test de Buishand a confirmé les résultats du test de Pettitt, de plus, le test de Buishand a détecté de rupture pour les stations de Ghazaouet en 2006 avec une hausse de 25% et Alger en 1976 avec une baisse de 27%.

IV.4 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre nous avons tenté de caractériser les éventuelles fluctuations du régime pluviométrique sur le littoral Algérien par l'application d'une série de tests jugés robustes afin de vérifier :

- Le caractère aléatoire des séries pluviométriques.
- La présence de ruptures significatives qui ont affecté les séries chronologiques étudiées et causé des changements importants des moyennes pluviométriques interannuelles.

En premier lieu nous nous sommes intéressés à l'étude du caractère aléatoire des données annuelles des 10 stations pluviométriques. Après présentation des tests existants dans la littérature, nous avons choisi les tests de corrélation sur le rang et le test de l'autocorrélogramme.

Après application de ces deux tests, nous avons remarqué qu'ils aboutissent au même résultat. En effet, les stations du Centre et de l'Est ont un caractère aléatoire, alors que les stations de l'Ouest présentent une tendance sans définir son type vu que leur caractère n'est pas aléatoire, exceptée pour celle d'Oran.

La deuxième catégorie de tests que nous avons appliqués nous ont permis de définir le type de tendance et la détection des ruptures au sein des séries de données pluviométrique avec les dates de leur occurrence. Les tests retenus sont ceux de Pettitt, de Lee & Heghinian, de la segmentation d'Hubert, le test de Buishand et l'ellipse de contrôle associée.

Pour l'interprétation des résultats obtenus à partir de ces tests nous n'avons retenu que les ruptures les plus importantes et les plus significatives. Le test de Pettitt détecte les ruptures d'une série mais pas celles situées aux extrémités de l'intervalle des données. Les stations concernées par ce test sont donc : Arzew, Mostaganem et Tlemcen. A l'inverse du test de Pettitt, la procédure bayésienne de Lee & Heghinian a l'avantage de signaler toutes les ruptures même celles aux extrémités des intervalles même si certaines de ces ruptures ne sont pas significatives, exceptée celle de Ghazaouet. La segmentation d'Hubert donne tous les changements de la moyenne d'une série, même si parfois ces derniers ne consistent pas en des ruptures. Le test de Buishand étant le test le plus robuste parmi ces tests car il ne détecte que les ruptures significatives même celles situées aux extrémités des intervalles, l'ellipse de contrôle est une illustration graphique de ce test qui nous permet d'associer à chaque rupture une date exacte.

En résumé, les stations concernées par les ruptures sont : Arzew, Ghazaouet, Mostaganem, Tlemcen et Alger.

Nous remarquons que pour les stations où la rupture s'est produite avant 1980 à savoir Alger (1976) et Tlemcen (1980), celle-ci met en évidence un déficit respectif très important de l'ordre de 27% et 44%.

Alors que pour les stations d'Arzew, Ghazaouet et Mostaganem où les ruptures se sont produites respectivement en 1998, 2006 et 1995. Des excédents ont été enregistrés et sont respectivement de l'ordre de 33%, 25% et 28%.

Ces résultats confirment les conclusions du chapitre précédent ainsi que ceux trouvés par Medjerab (2005) et Janati et Hanchane (2011) à savoir qu'après les longues sécheresses observées au cours des années 80 et 90, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée.

Chapitre V

Analyse du régime
pluviométrique par les
chaines de Markov

V.1 Introduction

L'évolution, au cours du temps, des phénomènes où intervient le hasard ou dont les causes qui régissent sont si complexes et multiples sont bien représentés par des modèles aléatoires.

Le résultat des observations des pluies annuelles n'est qu'une suite de valeurs successives plus ou moins liées traduisant ainsi une certaine corrélation existante entre-elle.

Un modèle très fréquent de dépendance est celui imaginé vers 1910 par le mathématicien russe A. Markov pour rendre compte de la succession des voyelles et consonnes utilisées dans un poème qu'il étudiait alors.

Le processus $\mathbf{X}(t)$ est markovien si quelle que soit la suite la suite croissante d'instantanés t_1, t_2, \dots, t_n antérieurs à t :

$$P_r\{\mathbf{X}(t) = \mathbf{x} \mid \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{X}(t_n) = \mathbf{x}_n\} = P_r\{\mathbf{X}(t) = \mathbf{x} \mid \mathbf{X}(t_n) = \mathbf{x}_n\}$$

C'est-à-dire que quelles que soient les informations recueillies au passé, la loi conditionnelle $\mathbf{X}(t)$ ne dépend que du passé le plus récent.

Ce processus est dit stochastique s'il traite des événements aléatoires non indépendants.

Les chaînes de Markov peuvent être utilisées dans l'interprétation des phénomènes hydrométéorologiques qui suivent un processus aléatoire.

Les séries chronologiques d'événement aléatoires sont caractérisées par des variables qui peuvent être continues ou discrètes.

Une variable est dite discrète si elle résulte d'un comptage, par exemple le fait de pleuvoir ou non est une variable discrète. Et elle est dite continue si elle est représentée par des valeurs mesurées, par exemple : les débits, les précipitations, la température au pas de temps journalier et annuel.

Dans une série chronologique d'événements aléatoires caractérisée par une variable aléatoire continue, on cherche souvent une relation entre les valeurs successives de celle-ci :

- Si $\mathbf{x} = \mathbf{0}$: on dira que les événements sont parfaitement indépendants.
- Si $\mathbf{x} = \mathbf{1}$: Ils seront dits liés « linéairement ».

Si l'état d'un jour k dépend de celui des jours précédents, on dira que le phénomène étudié suit une chaîne de Markov.

Celle-ci sera le premier ordre si l'événement au jour k ne dépend que de celui du jour précédent, elle sera du $n^{\text{ème}}$ ordre si ce même événement dépend des jours $k-1, k-2, \dots, k-n$.

V.2 Les modèles binaires

Leur principe est basé sur l'existence de deux états :

- **Etat 0** : représente le jour où la pluie est nulle ou inférieure à un seuil.
- **Etat 1** : représente le jour où la pluie est supérieure à ce seuil.

A noter que ce seuil est défini selon la variable à expliquer (dans le cas de notre étude les totaux annuels des précipitations).

V.2.1 Les modèles d'ordre 0

Dans ces modèles, on ne tient compte que de l'événement lui-même, l'influence des années précédentes est considérée comme nulle. La matrice de passe est obtenue par simple comptage de la série historique.

V.2.1.1 Exemple de construction d'une chaîne de Markov d'ordre 0

Supposons que pour une station X, on caractérise la pluie annuelle par l'un des deux états suivants :

- **0** : sécheresse si la pluie est inférieure à **400 mm /an**.
- **1** : pas de sécheresse si la pluie est supérieure à **400 mm/an**.

Pour une période d'observation de 45 ans, on dispose donc d'une séquence du type 001001110.....

Si on veut représenter cette suite par un modèle de Markov d'ordre 0 il suffira d'effectuer un comptage de la série historique pour obtenir le tableau suivant :

Pluie annuelle

0	1	Total
21	24	45

D'où en divisant les colonnes de A et B par leur total on obtient la matrice de passage d'ordre 0 ou à probabilité inconditionnelle :

	0	1
P	0.466	0.534

✓ **Propriété de la matrice de passage :**

Une matrice de passage est dite stochastique si les probabilités sont positives ou nulles et leur somme est égale à un :

- $P_{ij} \geq 0$
- $\sum_j P_{ij} = 1$

Pour l'exemple précédent, cette propriété est bien vérifiée puisque les P_{ij} sont positives et leur somme est bien égale à un ($0.466 + 0.534 = 1$).

V.2.2 Les modèles d'ordre 1

Les processus d'ordre 1 est caractérisé par les probabilités conditionnelles de passage de l'état e la veille à l'état d'aujourd'hui c'est-à-dire qu'on ne tient compte que des événements qui se sont produits la veille.

Soient X la variable aléatoire caractérisant l'état ($X = 0$ ou 1) et X_k , la valeur du jour k , soit i l'état réalisé le jour $k-1$ ($i = 0$ ou 1) et j l'état réalisé le jour k ($j = 0$ ou 1), la probabilité conditionnelle est la probabilité de l'état j au jour k sachant qu'était réalisé l'état i au jour $k - 1$.

$$\text{Prob} \{x_k = j \mid x_{k-1}\} = \alpha_{ij}$$

Avec deux états, il y'aura quatre possibilités :

Tableau V.1 : Matrice de passage d'ordre 1

Etats au Jour $K - 1$	Etats aux jours K	
	0	1
0	α_{00}	α_{01}
1	α_{10}	α_{11}

$$\alpha_{00} + \alpha_{01} = 1$$

Avec

$$\alpha_{10} + \alpha_{11} = 1$$

Et

$$\alpha_{ij} \geq 0$$

Ces coefficients sont obtenus par le décompte des jours caractérisés par les états (i, j).

En reprenant l'exemple précédent pour un modèle Markovien d'ordre 1 : il faut noter $j = 1$ à 44 ou à 44 couples de pluies annuelles (jour j , jour $j+1$). On a le tableau suivant :

Pluie annuelle

Etat	0	1	Total
0	7	14	21
1	13	10	23

En divisant chaque ligne par son total on obtient la matrice de transition :

Etat	0	1
0	0.333	0.667
1	0.565	0.435

Qui est bien une matrice de passage stochastique car tous les $a_{ij} \geq 0$ et $\sum_j a_{ij} = 1$.

V.2.3 Les modèles d'ordre 2

Le problème est de déterminer la probabilité de l'état de classe 0 ou 1 Aujourd'hui en fonction des états connus Hier et Avant-Hier. Le dénombrement statistique fournit les probabilités conditionnelles du tableau suivant

Tableau V.2 : Matrice de passage d'ordre 2

Hier- Avant-hier	Hier-Aujourd'hui			
	00	01	10	11
00	β_{000}	β_{001}		
01			β_{010}	β_{011}
10	β_{100}	β_{101}		
11			β_{110}	β_{111}

β_{ijk} : représente la probabilité conditionnelle d'obtenir un doublet de classe jk succédant à un autre de classe ij .

Il est évident que du fait que chevauchement de deux couples sur la veille, il est nécessaire d'avoir l'égalité de la classe dans les deux couples. Pour cet ordre, l'état au jour k dépend de l'état d'aujourd'hui $k - 1$ et $k - 2$. Lors de la définition de la matrice de passage exprimant les probabilités des couples successifs. Il y a impossibilité de certaines combinaisons vues la succession de certains doublets.

V.2.4 Les modèles d'ordre 3

Les probabilités conditionnelles de l'état au jour k en faisant intervenir les réalisations des états des 3 jours précédents, Avant-Avant-Hier ($k-3$), Avant-Hier ($k-2$) et Hier ($k-1$), avec un modèle binaire (à deux état 0 et 1), auront 2^3 triplets, la matrice de transition de présente comme suit :

Tableau V.3 : Matrice de passage d'ordre 3

Avant-Avant-Hier Avant-Hier Hier	Avant-Hier - Hier - Aujourd'hui							
	000	001	010	011	100	101	110	111
000	γ_{0000}	γ_{0001}						
001			γ_{0010}	γ_{0011}				
010					γ_{0100}	γ_{0101}		
011							γ_{0110}	γ_{0111}
100	γ_{1000}	γ_{1001}						
101			γ_{1010}	γ_{1011}				
110					γ_{1100}	γ_{1101}		
111							γ_{1110}	γ_{1111}

γ_{ijkl} : représente la probabilité d'obtenir un triplé de classe jkl succédant à un triplé de classe ijk .

On peut aller plus loin dans la prise en compte des informations antérieures ayant une incidence sur la probabilité du jour précédent.

On remarque que le nombre des coefficients augmente exponentiellement avec l'ordre des chaînes de Markov et la taille de la matrice devient très vite plus grande.

V.3 Analyse du régime pluviométrique sur le littoral Algérien par les chaînes de Markov

Nous avons appliqué la méthode des chaînes de Markov pour caractériser la succession des années sèches et non sèches en tenant compte de l'année elle-même (chaînes de Markov d'ordre 0), des années i et $i - 1$ (Chaîne de Markov d'ordre 1) et enfin des années $i, i - 1$ et $i - 2$ (chaînes de Markov d'ordre 2). Pour cela nous avons déterminé le seuil de sécheresse par deux méthodes différentes, la première est la méthode des quintiles et la deuxième est la méthode des terciles.

On désigne par Q la répartition des séries par la méthode des quintiles et T la méthode des Terciles.

V.3.1 Par station

V.3.1.1 Chaînes de Markov d'ordre 0

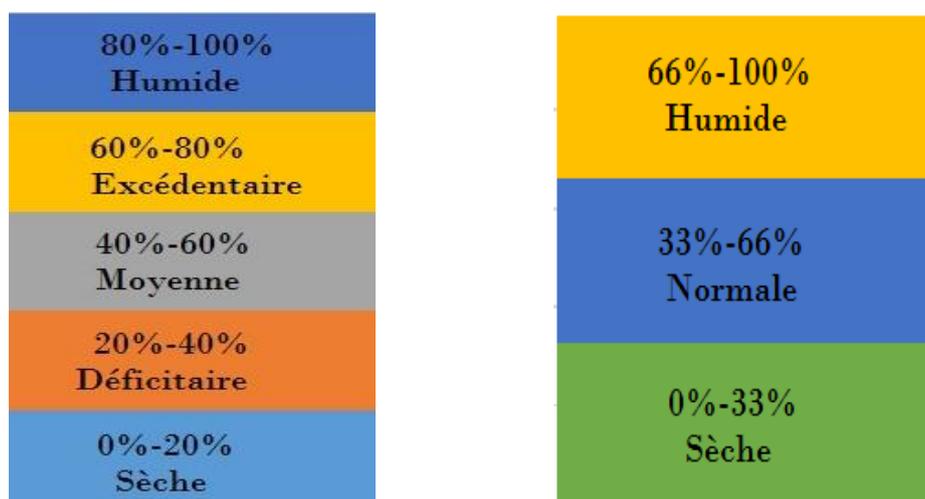
Les probabilités d'avoir des années sèches et non sèches pour les différentes stations sont données dans le tableau suivant :

Tableau V.4 : Matrice de Passage d'ordre 0 pour les 10 stations

Station	Nb années sèches		Nb années non sèches		Probabilité années sèches (%)		Probabilité années non sèches (%)	
	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T
Arzew	9	15	36	30	20	33	80	67
Ghazaouet	9	15	36	30	20	33	80	67
Oran	9	15	36	30	20	33	80	67
Mostaganem	9	15	36	30	20	33	80	67
Tlemcen	9	15	36	30	20	33	80	67
Alger	9	15	36	30	20	33	80	67
Annaba	9	15	36	30	20	33	80	67
Skikda	9	15	36	30	20	33	80	67
Bejaia	9	15	36	30	20	33	80	67
Jijel	9	15	36	30	20	33	80	67

Le processus des chaînes de Markov d'ordre 0 est basé sur la méthode des quintiles, et la méthode des équiprobabilités sur l'hypothèse que les 20 % (méthode des quintiles) ou 33% (méthodes des équiprobabilités) des premières valeurs de chaque station après classement par ordre croissant des différentes séries annuelles de pluviométrie sont considérées comme des années sèches et les autres valeurs restantes sont des années non sèches.

Le choix de ses valeurs est justifié par le fait que la moyenne de chaque station se situe toujours dans l'intervalle dont la fréquence est comprise entre [0,4 ; 0.6].

**Figure VI.1 Classement des pluies par la méthode des quintiles et la méthode des terciles**

V.3.1.2 Chaîne de Markov d'ordre 1

Les probabilités issues du processus de Markov d'ordre 1 sont données dans le **tableau V.5** pour la méthode des quintiles et le **tableau V.6** pour la méthode des équiprobabilités.

Tableau V.5 : Matrice de passage d'ordre 1 pour les 10 Stations par la méthode Q

Station	Probabilités conditionnelles d'ordre 1			
	0-0	0-1	1-0	1-1
Arzew	0.67	0.33	0.06	0.94
Ghazaouet	0.33	0.67	0.14	0.86
Oran	0	1	0.23	0.77
Mostaganem	0.22	0.78	0.17	0.83
Tlemcen	0.33	0.67	0.17	0.83
Alger	0.44	0.56	0.14	0.86
Annaba	0.33	0.67	0.14	0.86
Skikda	0.25	0.75	0.19	0.83
Bejaia	0.22	0.78	0.20	0.80
Jijel	0.11	0.89	0.23	0.77

Les résultats obtenus montrent que :

a) Par la méthode Q :

- La probabilité d'avoir deux années sèches successives varie entre 0 et 67 %. Elle est relativement importante pour les stations d'Arzew et d'Alger, insignifiante pour la station de Jijel et nulle pour la station d'Oran.
- Le complément de cet événement a donc une forte probabilité de se produire c'est-à-dire que la probabilité d'avoir une année non sèche après une année sèche est grande.
- La probabilité d'avoir une année sèche après une année non sèche est très faible, et est inférieure à 23% pour toutes les stations étudiées.
- Par conséquent, avoir deux années non sèches devient donc un événement et sa probabilité dépasse les 75% pour toutes les stations.

Tableau V.6 : Matrice de passage d'ordre 1 pour les 10 Stations par la méthode T

Station	Probabilités conditionnelles d'ordre 1			
	0-0	0-1	1-0	1-1
Arzew	0.53	0.47	0.21	0.79
Ghazaouet	0.33	0.67	0.31	0.69
Oran	0.2	0.8	0.38	0.62
Mostaganem	0.4	0.6	0.28	0.72
Tlemcen	0.33	0.67	0.31	0.69
Alger	0.33	0.67	0.34	0.66
Annaba	0.33	0.67	0.31	0.69
Skikda	0.29	0.71	0.37	0.63

Bejaia	0.33	0.67	0.34	0.66
Jijel	0.07	0.93	0.43	0.57

b) Par la méthode T :

- La probabilité d'apparition de deux années sèches successives n'est pas aussi forte que précédemment et varie entre 0 et 53 %, néanmoins elle reste toujours importante pour la station d'Arzew et pratiquement nulle pour la station de Jijel.
- La probabilité d'avoir deux années humides est importante, elle dépasse l'ordre de 60% ou plus pour toutes les stations.
- Les probabilités d'avoir respectivement une année humide après une année sèche et une année sèche après une année humide ont légèrement augmenté par rapport à la méthode des quintiles et ce pour toutes les stations.

Pour les chaînes de Markov d'ordre 1, il est visible que les probabilités d'avoir des épisodes humides sont plus importantes que celles des épisodes secs et ce quelque soit le seuil de sécheresse.

V.3.1.3 Les chaînes de Markov d'ordre 2

L'algorithme Markovien d'Ordre deux nous donne les probabilités possibles des différents événements en tenant compte de trois années successives :

Tableau V.7 : Matrice de passage d'ordre 2 pour les 10 stations par la méthode Q

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 2							
	0-0-0	0-0-1	0-1-0	0-1-1	1-0-0	1-0-1	1-1-0	1-1-1
Arzew	0.67	0.33	0	1	1	0	0.06	0.94
Ghazaouet	0.67	0.33	0.17	0.83	0.2	0.8	0.14	0.86
Oran	0	0	0.44	0.56	0	1	0.15	0.85
Mostaganem	0	1	0.14	0.86	0.33	0.67	0.18	0.82
Tlemcen	0	1	0.33	0.67	0.5	0.5	0.14	0.86
Alger	0.5	0.5	0.2	0.8	0.4	0.6	0.14	0.86
Annaba	0	1	0.17	0.83	0.6	0.4	0.14	0.86
Skikda	0	1	0.33	0.67	0.33	0.67	0.17	0.83
Bejaia	0	1	0.14	0.86	0.29	0.71	0.22	0.78
Jijel	0	1	0.13	0.88	0.13	0.88	0.27	0.73

Les résultats de la matrice de passage Markovienne d'ordre 2 montrent, en se focalisant sur les cas extrêmes, c'est-à-dire la succession d'années sèches et non sèches que :

a) Pour la méthode Q :

- La probabilité d'avoir trois années sèches est un événement dont la probabilité est nulle pour toutes les stations exceptées pour les stations d'Arzew, Ghazaouet et Alger ou celle-ci est quand même importante (elle varie entre 50 et 67%);
- Une année non sèche mettant fin à deux années sèches est donc un événement fort probable de se produire pour la majorité des stations ;
- La probabilité d'avoir deux années non sèches suivie d'une année sèche est faible, elle est de l'ordre de 30%;
- Avoir deux années non sèches après une année sèche, trois années non sèches sont des événements très forts de se produire, leur probabilité dépasse le seuil des 56% pour la majorité des stations.

Tableau V.8 : Matrice de passage d'ordre 2 pour les 10 stations par la méthode T

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 2							
	0-0-0	0-0-1	0-1-0	0-1-1	1-0-0	1-0-1	1-1-0	1-1-1
Arzew	0.75	0.25	0	1	0.33	0.67	0.27	0.73
Ghazaouet	0.6	0.4	0.3	0.7	0.22	0.78	0.32	0.68
Oran	0	1	0.33	0.67	0.27	0.73	0.41	0.59
Mostaganem	0.5	0.5	0.11	0.89	0.38	0.63	0.35	0.65
Tlemcen	0.2	0.8	0.4	0.6	0.44	0.56	0.26	0.74
Alger	0.4	0.6	0.3	0.7	0.3	0.7	0.39	0.61
Annaba	0.2	0.8	0.2	0.8	0.44	0.56	0.37	0.63
Skikda	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.8	0.32	0.68
Bejaia	0.4	0.6	0.4	0.6	0.3	0.7	0.28	0.72
Jijel	0	1	0.38	0.62	0.08	0.92	0.47	0.53

b) Pour la méthode T :

- La probabilité d'avoir trois années sèches reste en dessous de 50% pour toutes les stations, exceptées pour les stations d'Arzew, Ghazaouet et Skikda, seule la station de Jijel possède une probabilité nulle.
 - Une diminution pour la probabilité d'avoir une année humide après deux années sèches, elle varie entre 50% et 80% pour la plupart des stations
 - La probabilité d'avoir deux années sèches après une année humide ou une année sèche après deux années humides n'atteint jamais les 50% pour toutes les stations.
 - La probabilité d'avoir deux années humides après une année sèche est importante et dépasse pas les 50% pour toutes les stations.
 - La probabilité d'avoir trois années humides successives est très importante est dépasse dans tout les cas de figure les 50%.
- ✓ On comparant les résultats de la matrice de passage Markovienne pour les deux méthodes en question on remarque une diminution plus ou moins significative pour les événements nettement non secs et une augmentation de probabilité d'avoir une

succession d'années sèches. Cela signifie que lorsqu'on augmente le seuil de sécheresse leur persistance devient plus longue.

V.3.1.4 Chaînes de Markov d'ordre 3

Pour mieux affiner notre étude nous avons jugé utile de calculer la matrice de passage d'ordre 3. Le calcul des différentes probabilités en tenant compte de 4 jours successifs est donné dans les tableaux suivants :

Tableau V.9 : Matrice de Passage d'ordre 3 pour les 10 stations par la méthode Q

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	0-0-0-0	0-0-0-1	0-0-1-0	0-0-1-1	0-1-0-0	0-1-0-1	0-1-1-0	0-1-1-1
Arzew	0.75	0.25	0	1	0	0	0	1.0
Ghazaouet	0.5	0.5	0	1	0	1	0.2	0.8
Oran	0	0	0	0	0	1	0.2	0.8
Mostaganem	0	0	0	1	0	0	0	1
Tlemcen	0	0	0	1	0.5	0.5	0	1
Alger	0	1	0	1	0	1	0.25	0.75
Annaba	0	0	0.33	0.67	1	0	0	1
Skikda	0	0	0.5	0.5	0	1	0	1
Bejaia	0	0	0	1	0	1	0	1
Jijel	0	0	0	1	0	1	0.29	0.71

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	1-0-0-0	1-0-0-1	1-0-1-0	1-0-1-1	1-1-0-0	1-1-0-1	1-1-1-0	1-1-1-1
Arzew	0.5	0.5	0	0	1	0	0.07	0.93
Ghazaouet	1	0	0.25	0.75	0.25	0.75	0.13	0.88
Oran	0	0	0.5	0.5	0	0	0.14	0.86
Mostaganem	0	1	0	0	0.4	0.6	0.23	0.77
Tlemcen	0	1	0.67	0.33	0.5	0.5	0.17	0.83
Alger	1	0	0.67	0.33	0.5	0.5	0.13	0.88
Annaba	0	1	0	1	0.5	0.5	0.17	0.83
Skikda	0	1	0	0	0.5	0.5	0.21	0.79
Bejaia	0	1	0.2	0.8	0.33	0.67	0.3	0.7
Jijel	0	1	0.14	0.86	0.14	0.86	0.28	0.72

En se focalisant sur l'analyse des cas extrêmes (succession d'années sèches et non sèches) nous remarquons que :

a) Pour la méthode Q :

- La probabilité d'avoir quatre années sèches successives est nulle pour toutes les stations, exceptée pour Arzew et Ghazaouet.

- Par contre la probabilité d'avoir quatre années humides successives est très forte et ne descend pas en dessous de 70% et dépasse souvent les 80% pour toutes les stations.

Tableau V.10 : Matrice de Passage d'ordre 3 pour les 10 stations par la méthode T

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	0-0-0-0	0-0-0-1	0-0-1-0	0-0-1-1	0-1-0-0	0-1-0-1	0-1-1-0	0-1-1-1
Arzew	0.67	0.33	0	1	0	0	0.29	0.71
Ghazaouet	0.67	0.33	0	1	0	1	0.43	0.57
Oran	0	0	0.33	0.67	0	1	0.5	0.5
Mostaganem	0	1	0	1	0	1	0.25	0.75
Tlemcen	0	1	0	1	0.5	0.5	0.4	0.6
Alger	0	1	0.33	0.67	0.67	0.33	0.57	0.43
Annaba	0	1	0.25	0.75	1	0	0.14	0.86
Skikda	0.5	0.5	0	1	0	1	0	1
Bejaia	0	1	0.67	0.33	0	1	0.17	0.83
Jijel	0	0	0	1	0	1	0.5	0.5

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	1-0-0-0	1-0-0-1	1-0-1-0	1-0-1-1	1-1-0-0	1-1-0-1	1-1-1-0	1-1-1-1
Arzew	1	0	0	1	0.33	0.67	0.27	0.73
Ghazaouet	0.5	0.5	0.43	0.57	0.33	0.67	0.25	0.75
Oran	0	1	0.38	0.63	0.43	0.57	0.33	0.67
Mostaganem	1	0	0.2	0.8	0.43	0.57	0.42	0.58
Tlemcen	0.25	0.75	0.8	0.20	0.4	0.6	0.21	0.79
Alger	0.67	0.33	0.29	0.71	0.14	0.86	0.3	0.7
Annaba	0.25	0.75	0.2	0.8	0.29	0.71	0.5	0.5
Skikda	0.5	0.5	0.63	0.38	0.4	0.6	0.46	0.54
Bejaia	0.67	0.33	0.29	0.71	0.6	0.4	0.33	0.67
Jijel	0	1	0.45	0.55	0.29	0.71	0.44	0.56

b) Pour la méthode T :

- La probabilité d'avoir quatre années sèches, est dans l'ensemble nulle comme pour la méthode Q, sauf pour les stations d'Arzew, Ghazaouet et Skikda
- Par contre la probabilité d'avoir quatre années humides successives diminue par rapport à la méthode Q et ne dépasse jamais les 75% pour toutes les stations.

V.3.2 Application des chaînes de Markov à l'échelle régionale

La même méthodologie sera utilisée à cette échelle pour toutes les stations mais uniquement pour les processus d'ordre 2 et 3.

V.3.2.1 Les chaînes de Markov d'ordre 2

Les matrices de passage d'ordre 2 pour les méthodes de quintiles et équiprobable sont donnés dans les **tableaux V.11** et **V.12** :

Tableau V.11 : Matrice de passage d'ordre 2 par région par la méthode Q

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 2							
	0-0-0	0-0-1	0-1-0	0-1-1	1-0-0	1-0-1	1-1-0	1-1-1
Ouest	0	1	0.13	0.88	0.14	0.86	0.22	0.78
Centre	0.5	0.5	0.2	0.8	0.4	0.6	0.14	0.86
Est	0	1	0.13	0.88	0.13	0.88	0.27	0.73

a) Pour la méthode Q :

- La probabilité d'avoir 3 années sèches successives est nulle à l'Est et à l'Ouest, elle est moyenne au Centre.
- La probabilité d'avoir trois années humides est considérable pour toutes les régions, et atteint les 86 % au Centre.

Tableau V.12 : Matrice de passage d'ordre 2 par région par la méthode T

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 2							
	0-0-0	0-0-1	0-1-0	0-1-1	1-0-0	1-0-1	1-1-0	1-1-1
Ouest	0.4	0.6	0.2	0.8	0.33	0.67	0.37	0.63
Centre	0.4	0.6	0.3	0.7	0.3	0.7	0.39	0.61
Est	0.2	0.8	0.33	0.67	0.44	0.56	0.35	0.65

b) Pour la méthode T :

- La probabilité d'avoir trois années sèches successives est comprise entre 20 et 40%.
- La probabilité d'avoir trois années humides qui se suivent est modérément importante, et tourne autour de 63% pour toutes les régions.

On remarque que la probabilité d'avoir un cycle sec augmente par rapport à la première méthode par contre la probabilité d'avoir un cycle humide diminue.

V.3.2.2 Les chaînes de Markov d'ordre 3

L'application des chaînes de Markov d'ordre 3 a donné les résultats présentés dans les quatre tableaux suivant :

Tableau V.13 : Matrice de Passage d'ordre 3 par région par la méthode Q

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	0-0-0-0	0-0-0-1	0-0-1-0	0-0-1-1	0-1-0-0	0-1-0-1	0-1-1-0	0-1-1-1
Ouest	0	0	0	1	0	1	0.14	0.86
Centre	0	1	0	1	0	1	0.25	0.75
Est	0	0	0	1	0	1	0.29	0.71

Stations	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	1-0-0-0	1-0-0-1	1-0-1-0	1-0-1-1	1-1-0-0	1-1-0-1	1-1-1-0	1-1-1-1
Ouest	0	1	0.17	0.83	0.17	0.83	0.25	0.75
Centre	1	0	0.67	0.33	0.5	0.5	0.13	0.88
Est	0	1	0.14	0.86	0.14	0.86	0.28	0.72

a) Pour la méthode Q :

- La probabilité d'avoir quatre années sèches est nulle pour toutes les régions.
- La probabilité d'avoir quatre années humides successives est importante, et dépassant les 72% pour toutes les régions.

Tableau V.14 : Matrice de Passage d'ordre 3 par région par la méthode T

Stations 3	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	0-0-0-0	0-0-0-1	0-0-1-0	0-0-1-1	0-1-0-0	0-1-0-1	0-1-1-0	0-1-1-1
Ouest	0	1	0.33	0.67	0.50	0.50	0.25	0.75
Centre	0	1	0.33	0.67	0.67	0.33	0.57	0.43
Est	0	1	0.25	0.75	0.33	0.67	0.17	0.83

Stations 3	Probabilités conditionnelles d'ordre 3							
	1-0-0-0	1-0-0-1	1-0-1-0	1-0-1-1	1-1-0-0	1-1-0-1	1-1-1-0	1-1-1-1
Ouest	0.67	0.33	0.17	0.83	0.29	0.71	0.45	0.55
Centre	0.67	0.33	0.29	0.71	0.14	0.86	0.30	0.70
Est	0.25	0.75	0.40	0.60	0.50	0.50	0.46	0.54

Par la méthode T :

- Comme pour la méthode Q, la probabilité d'avoir quatre années sèches qui se suivent est nulle pour toutes les régions.
- La probabilité d'avoir quatre années humides est moyenne à l'Est et à l'Ouest, et est un peu plus importante au Centre.

On remarque qu'à l'échelle régionale la probabilité d'avoir une succession d'années sèches est nulle pour les deux méthodes alors qu'elle beaucoup plus importante pour une succession d'années humides pour la méthode des quintiles.

V.4 Conclusion

L'analyse des séries pluviométrique par les chaînes de Markov nous était très utile pour comprendre la persistance du phénomène de la sécheresse sur le littoral Algérien.

En effet, cette méthode nous a permis de déterminer la localisation des années sèches dans le temps et dans l'espace mais aussi les probabilités qu'un événement sec ou non sec se produise.

Ce processus exprime les probabilités de l'année en cours en tenant compte des états des années précédentes selon l'ordre de la matrice de passage.

Nous constatons d'une façon générale qu'une persistance de la sécheresse a touché les régions Ouest et Centre au début des années 80, une succession d'année sèche en cette période a influencé les probabilités de cet événement. La région Est a aussi connu des années de sécheresse intenses mais réparties d'une façon aléatoire durant la période allant de 1980 à 2002.

Depuis l'année 2002 le régime pluviométrique a une tendance visible à la hausse, cette période est très humide pour toutes les régions, les années sèches sont donc très peu observées.

En faisant varier le seuil de sécheresse par les méthodes des Quintiles et Terciles nous avons remarqué une diminution des épisodes humides et une augmentation des épisodes secs à savoir leur longueur, la différence se manifeste en termes d'intensité de sécheresse, pour la région Ouest les années sèches sont présentes en bloc (nombre d'années successives important) pendant les années 80, pour les régions Centre et Est, les épisodes secs observés sont moins longs et localisée durant les années 80 et 90.

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 de la pluviométrie observée sur le littoral Algérien, particulièrement durant la période 1970-2014, 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 soit leur déficit, soit leur excédent.

Cette étude s'est basée sur l'analyse de données pluviométriques observées au niveau de 10 stations réparties sur le littoral Algérien et qui ont fonctionné plus ou moins sans arrêt depuis 1970.

L'examen visuel des données a montré que certaines séries présentaient un certain nombre de lacunes. Pour tester l'homogénéité de nos séries nous avons utilisé la méthode du double cumul. Elle a mis en évidence qu'aucune irrégularité apparente n'a affecté les séries à contrôler.

L'étude de la variabilité des précipitations à partir des totaux annuels, faite sur la totalité des stations a montré une inégalité importante entre les stations du Centre et de l'Est par rapport à celles de l'Ouest.

D'une manière générale, la variabilité relative croit quand la pluviométrie diminue. Ainsi, on a des coefficients de variations faibles dans les régions humides du Nord - Est du pays. Par contre, dès qu'on s'éloigne vers l'Ouest qui est plus aride, on constate que l'irrégularité pluviométrique devient plus élevée.

En scindant nos séries en quatre décades, on a remarqué que la période 2003 à 2014 représentait la période la plus humide pour toutes les stations, exceptées pour celles de Tlemcen et Alger où c'était la première période (1970 à 1981) qui était la plus arrosée, alors que la deuxième décade constituait la période la plus déficitaire pour toutes les stations de l'Ouest.

Le calcul de l'indice pluviométrique standardisé annuel, nous a permis de constater, qu'en termes de fréquences, un pourcentage moyen de 54 % d'années sèches dont 2 % représente une sécheresse extrêmement élevée, contre 46 % d'années humides et que les périodes déficitaires sont plus étendues dans l'espace et plus persistantes dans le temps que les périodes excédentaires.

L'indice SPI montre que la durée maximale séparant les deux sécheresses généralisées enregistrées en 1983 et 1988 est de 5 ans, alors que la durée de la sécheresse varie selon les régions d'une année à douze. On peut dire que la sécheresse n'est pas un phénomène

homogène, elle s'étend sur des périodes différentes, avec une intensité variable, elle affecte également des zones ayant diverses caractéristiques topographiques et climatiques.

L'application des tests statistiques nous a permis de mettre en évidence des tendances sans définir leur type vu que leur caractère n'est pas aléatoire et de détecter des ruptures pour les stations suivantes : Arzew, Ghazaouet, Mostaganem, Tlemcen et Alger.

Nous avons remarqué que pour les stations où la rupture s'est produite avant 1980 à savoir Alger (1976) et Tlemcen (1980), elle met en évidence un déficit respectif très important de l'ordre de 27% et 44%. Alors que pour les stations d'Arzew, Ghazaouet et Mostaganem où les ruptures se sont produites respectivement en 1998, 2006 et 1995. Des excédents ont été enregistrés et sont respectivement de l'ordre de 33%, 25% et 28%.

Ces résultats confirment les conclusions du chapitre précédent ainsi que ceux trouvés par Medjerab (2005) et Janati et Hanchane (2011) à savoir qu'après les longues sécheresses observées au cours des années 80 et 90, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée.

L'analyse des séries pluviométriques par les chaînes de Markov nous a permis de déterminer la localisation des années sèches dans le temps et dans l'espace mais aussi les probabilités qu'un événement sec ou non sec se produise.

Nous avons noté de façon générale qu'une persistance de sécheresse a touché les régions Ouest et Centre au début des années 80, avec une succession d'années sèches en cette période qui a influencé les probabilités de cet événement. La région Est, a connu aussi des années de sécheresse intenses, mais réparties d'une façon aléatoire durant la période allant de 1980 à 2002.

Depuis l'année 2002 le régime pluviométrique a une tendance visible à la hausse, cette période est très humide pour toutes les régions et les années sèches sont très peu observées.

Finalement, nous sommes persuadés que les résultats obtenus offrent des informations sur l'intensité et la variabilité des précipitations et ses aspects spatio-temporels. Ce travail, permet d'une part, aux décideurs, de localiser spatialement les régions sujettes aux accidents pluviométriques. D'autre part, notre étude serait un complément à celles menées dans ce domaine.

Références bibliographiques

ASSANI A. (1999): Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Nino/La Nina). Sécheresse N°4, volume 10, décembre 1999, pp 245-252.

Azzi A., Medjerab A. - Caractérisation de la sécheresse climatique dans la Nord Centre de l'Algérie : Cas du bassin versant de la Soummam, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rovereto, pp. 51- 56. (2011).

Bagnouls F. & Gaussen H. - Les climats biologiques et leur classification, Annales de Géographie, Volume 355, pp. 193-220. (1957)

BUIHAND T.A. (1982):Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of hydrology 58, 11-27.

BUIHAND T.A. (1984):tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. Journal of hydrology 73, 51-69.

CHAUMONT M. (1970) : Cours de statistiques expérimentales et appliquées à l'usage des naturalistes. Certificat d'Etudes Supérieures d'Hydrogéologie, Univ. Alger, 82 p.Coll. cristallisation, déformation, dissolution des carbonates, 17-18 novembre 1980, Bordeaux, p. 11-23.

Chaumont M., Paquin C. - Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000, Soc, Hist, Afri, Nord, Alger. (1971)

Daget P. - Le bioclimat méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation, Végétation, Volume 34, pp. 1-20. (1977)

Duplessy J C. - État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Séries IIA - Earth and Planetary Science, Volume 333, Issue 12, 31, pp. 765-773. (2001),

Emberger L., - Aperçu général sur la végétation du Maroc : Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1/150 000, Mémoire de la Société des Sciences Naturelles du Maroc, pp. 40-157. (1941)

Flageollet J-C. - Atlas régional du réchauffement climatique 1971-2010, Géographie Physique et Environnement. (2012).

Humbert J. - Quantification spatiale des précipitations. Application au nord-est de la France. Revue de Géographie de l'Est, pp. 1-16. (2000)

Gaussen H., Roux G. & Bagnouls F. - Carte des précipitations du Maroc (1925-1949), Dir, Agro, et Forêt, Rabat, (1957)

GIEC. - Impacts adaptation and vulnerability, Summary for policymakers, Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. (2007)

Gregory S. - On the determination of regional patterns of recent climatic fluctuations, *Weather*, Volume 30(9), pp, 276-288, (1975)

Heghinian, S M & Lee, A F S - A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables - a Bayesian approach, *Technometrics*, Volume 19 (4), pp. 503-506. (1977)

Hubert P., Carbonnel JP., Chaouche A. - Segmentation des séries hydrométéorologiques, Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest, *Journal of Hydrology*, Volume 110, pp. 349-367. (1989)

IPCC. - Climate Change (1992) Houghton ST, Callander BA, Varney SK (eds) Cambridge U Press, Cambridge, UK. (1992)

IPCC. - Climate Change, The physical science basis, Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p. (2007)

IPCC. - Climate Change, The science of climate change, J,T, Houghton, L,G, Meira Filho,, Callender B,A, N, Harris, A, Kattenberg, A, Maskell (eds), Cambridge University Press, Cambridge. (1995)

IPCC. - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2012. <http://www.ipcc-wg2.gov/SREX>; (2012)

Isnard H. - La répartition saisonnière des pluies au Maroc, *Annales de Géographie*, Volume 67(359), pp. 39-42. (1958)

Janati AI. & Hanchane M. - Types de circulations atmosphériques à l'origine des risques climatiques majeurs au Maroc, entre septembre 2008 et novembre 2010, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rovereto, pp. 339-344. (2011)

Jones P D. - Hemispheric surface air temperature variations: Recent trends and an up-date to 1987, *J Clim*. Volume 1, pp. 654-660. (2008)

Kendall MG. - Rank Correlation Methods, 4th ed., Charles Griffin: London. UK. (1975).

Kendall MG. & Stuart A. - The Advanced Theory of Statistics, In: Population, 18ème année, n°2, 396p. (1963)

Kendall SM., Stuart A. - The Advanced theory of statistics, Charles Griffin Londres, Volume 3, 585 p. (1943)

Lee AFS., S M. Heghinian. - A shift of the mean level in sequence of independent normal random variables a Bayesian approach, *Technometrics*, Volume 19(4), pp. 503-506. (1977)

Maheras P. - La variabilité des précipitations dans la Mer Egée, Arch. Met. Geoph, Biokl, Volume 29, pp. 157-166. (1981)

MATARI A., KERROUCHE M., BOUSID H., DOUGUEDROIT A., 1999. Sécheresse dans l'ouest algérien . publications de l'association internationale de climatologie , volume 12, 1999.

MEBARKI A., (1984) :ressources en eau et aménagement en Algérie ; le bassin du Kebir Rhumel. Edition : office des publications universitaires.

MEDDI H., 2001. Quantification des précipitations : application au Nord-Ouest de l'Algérie (Méthodologie de Pluvia). Mémoire demagister, C.U.Mascara, novembre 2001.

MEDDI M. ET HUBERT P. (2003): Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouestde l'Algérie. Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions. IAHS publication N° 278.

MEDDI M., HUBERT P. ET BENDJOUDI H. (2002) :Evolution du régime pluviométrique du Nord-Ouest de l'Algérie. Actes du colloque international sur l'eau dans le Bassin Méditerranéen : Ressources etdéveloppement Durable. Tunisie

MEDDI M., HUBERT J., 2002. Changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau. Forum international organisé par ACMAD sur les changements climatiques dans les pays méditerranées et de l'Afrique. Alger du 14 au 18 avril 2002.

MEDDI M., HUBERT J.,2000. Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. 13^{ème} colloque de l'Association Internationale de climatologie. 6 au septembre 2000 Nice, France.

MEDDI M., HUBERT P.,BENDJOUDI H., 2002. Evolution du régime pluviométrique du Nord-Ouest de l'Algérie. L'eau dans le bassin méditerranéen : ressources et développement durable Monastir, Tunisie, 10-12 octobre 2002.

MEDDI M., HUBERT P.,BENDJOUDI H.,2002. Impact du changement du régime pluviométrique sur les ressources en eau dans le Nord-Ouest de l'Algérie. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides, 1-4 avril 2002, Montpellier, France.

MEDDI M., MEDDI H.,2002. Sécheresse météorologique et agricole dans le Nord-Ouest de l'Algérie, colloque méditerranéen, eau etenvironnement. Alger le 7-9 octobre 2002.

Meddi H., Meddi M. - Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie, Sécheresse, Volume 20(1), pp. 57- 65. (2009)

Medjerab A., Henia L. - Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie Nord Occidentale, Revue Géographique de l'Est, Volume 45(2). 2005. - Temporal and spacial variabilation of drought in Morocco, Procceding of conference on drought, water management and food production, Agadir, Maroc, pp. 55-82. (1985)

- Mokssit A. - Le changement climatique : enjeux et perspectives d'adaptation pour le Maroc, Actes de la Rencontre internationale (ires), Rabat, pp. 63-71. (2009)
- Moonen AC., Ercoli L., Mariotti M. & Masoni A. - Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 111, pp. 13-27. (2002)
- Nicholls N., Gruza G V., Jouzel J., Karl TR., Ogallo LA., Parker DE. - Observed climate variability and change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 137-192. (1996)
- Nicholson S E. & Wigley T M L. - Drought in Morocco, The General Climatology of Drought, Report to the Conseil Supérieur de l'Eau. (1984)
- Nicholson SE., Wigley TML. - La sécheresse au Maroc, II- Analyse statistique des données pluviométriques, Rapport au conseil supérieur de l'eau. (1984).
- OMM. - Guide to climatological practices, Third edition, WMO N° 100, Geneva, 113 p. (2007)
- Pearson R G & Dawson T P. - Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?, Global Ecology & Biogeography, Volume 12, pp. 361- 371. (2003)
- Pettitt AN. - A non-parametric approach to the change-point problem, Applied Statistics, Volume 28(2), pp. 126-135. (1979)
- Piervitali E. et Colacino M. - Precipitation scenarios in the central-western Mediterranean Basin, Mediterranean Climate, Variability and trends, H J, Bolle ed, Springer, pp. 245-258. (2003)
- Quezel P., Médail F. - Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen, Elsevier-Lavoisier eds, Paris. (2003)
- Root T L., Price J T., Hall K R., Schneider S H., Rosenzweig C. & Pounds J A. - Fingerprints of global warming on wild animals and plants, Nature, Volume 421, pp. 57-60. (2003)
- Salinger M J. - New Zealand Climate: I, Precipitation Patterns, Mon, Wea, Volume 108, pp. 1892-1904. (1980)
- Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Hsain M & Saloui A. - Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004), Sécheresse, Volume 22, pp. 139-148. (2011)
- Servat E., Paturel JE., Lubès H., Kouamé B., Masson JM., Travaglio M. & Marieu B. - De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne, Rev sci eau, Volume 12(2), pp. 363-387. (1999)
- Stour L & Agoumi A. - Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies, Hydroécologie appliqué, Volume16, pp. 215-232. (2009)

Wigley TML., Briffa KR & Jones PD. - On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 23, pp. 201-213. (1984)