

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat

Année : 2014/2015

Département d'Hydraulique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **Doctorat en sciences**

Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda Nord-Est Algérie ».

Spécialité : Hydraulique

Par

KHOUALDIA WACILA

Devant le Jury

Président :	Ouerdachi Lahbassi	PROF.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba
Directeur de Thèse :	Djebbar Yassine	PROF.	UNIV.	Mohamed Cherif Messaâdia, Souk-Ahras
Co-directeur de Thèse :	Hammar Yahia	PROF.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba
Examineurs :	Djemili Lakhdar	PROF.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba
	BEARMAD Abdelmalek	PROF.	ENP.	Alger
	HASBAIA Mahmoud	M.C.A.	UNIV.	Msila

REMERCIEMENTS

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

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

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à mon Co-directeur de Thèse Monsieur HAMMAR YAHIA, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour ses conseils et pour l'attention soutenue qu'il m'a manifesté par ces encouragements et sa compréhension.

Tous mes vifs remerciements vont également à Monsieur Ouerdachi Lahbassi Professeur à l'université d'Annaba d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance, à messieurs Djemili Lakhdar Professeur à l'université d'Annaba, BEBRMAD Abdelmalek Professeur à ENP d'Alger et le docteur HASBAIA Mahmoud à l'université de Msila qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Mes grands remerciements à Monsieur HABIB ABIDA professeur à l'université de Sfax Tunis, pour ces conseils précieux.

Mes remerciements vont également aux personnels de l'Agence National des Ressources Hydriques de Constantine pour toutes leurs aides matérielles.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, mon Marie

Mes enfants: AbdelOuadoud, AbdelBasset, AbdelRaouf

Mes frères et mes sœurs

Mes beaux parents et mes amies.

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

الملخص

نتج عن تغير المناخ في السنوات الأخيرة في المنطق الجافة، شبه القاحلة في الجزائر، عدة فترات من الجفاف، حيث تميزت بقصان في هطول الأمطار و انخفاض في مستويات المجاري المائية السطحية و الجوفية، مما أدى إلى صعوبة تلبية الطلب بالنسبة لمياه الشرب و الزراعة. لذا معرفة العوامل المناخية و دراسة تأثيرها على الموارد المائية أمر ضروري لحسن التسيير في مثل هذه الحالات. تهدف هذه الدراسة إلى إظهار أثر التغير المناخي على الموارد المائية بواد مجرة (شمال شرق الجزائر). للقيام بذلك، بينات مناخية تتراوح على مدى فترات 19-38 سنة وأساليب؛ اختبارات إحصائية، مؤشرات التمرکز و هانينج من الظلم 2، وتحليل التردد، وسلاسل ماركوف، وقانون Mailliet ومعامل التجفيف، و نماذج احتمالية استخدمت. تطبيق مؤشرات التمرکز و هانينج لهطول الأمطار و السلاسل الهيدرولوجية بينت تغير مناخي يتميز بتناوب مراحل رطبة، عادية و جافة. هذه الطرق تشير إلى انخفاض في هطول الأمطار خلال فترتي الثمانينات و التسعينات. أظهرت نتائج تحليل اختبار السلاسل أنها تحوي على إنقطاعات معظمها متواجدة في فترتي الثمانينات و التسعينات. يلاحظ وجود اتجه لزيادة درجة الحرارة والتخرف في هذا الحوض. تاريخ بيانات هطول الأمطار تشير إلى أن هذه المنطقة تشهد تحولا حقيقيا في هطول الأمطار. أدت نتائج تغيير العوامل المناخية بمنطقة واد مجرة إلى انخفاض في توافر المياه خلال فترات الجفاف. مما أثر هذا التغير سلبيا على التوازن المائي وتغذية المياه الجوفية والحد من توافر احتياطي المياه بالمنطقة. عقب هذا الجفاف ازدادت هطول الأمطار القوية بعد سنوات الانقطاع كما عرفت معاملات الركود تراجعاً للسنوات الأخيرة عكسا كميات حشد المياه بالحوض. هذه النتائج تميزت بانتعاش في زيادة تغذية المياه الجوفية و بالتالي مخزون المياه بالمنطقة. ظهرت دراسة سلاسل ماركوف أن الجفاف ظاهرة متكررة في سنتين متتاليتين أو ثلاث سنوات أو أكثر. احتمال ظهور سنتين من الجفاف متتالية هو أكثر أهمية في المناطق الشمالية والجنوبية للمنطقة المعنية التي تساهم بطريقة كبيرة في الإنتاج الزراعي في البلاد. التذبذب في شمال المحيط الأطلسي يمكن أن يكون وراء هذا التغير في منطقة الدراسة.

أخيرا، تم اقتراح نماذج احتمالية، تساعد على إدارة المياه جيدا، ومكافحة الجفاف والفيضانات في هذا الحوض.

كلمات البحث: قلب هطول الأمطار، الجفاف، سلاسل ماركوف، قلب المناخ، حوض واد مجرة، شرق الجزائر

Résumé

Le changement climatique des dernières années a produit dans les régions arides à semi arides de l'Algérie, des périodes de sécheresse, qui sont caractérisées par des pluviométries déficitaires, et des écoulements très faibles des principaux oueds des bassins versants. Pendant les périodes sèches, les ressources en eau de surface et, par conséquent, les volumes stockés subissent une diminution très nette. Il devient parfois difficile de satisfaire la demande en eau potable, en particulier celle destinée à l'agriculture. Afin de mieux gérer une telle situation, la connaissance des facteurs climatiques et l'étude de son impact sur les ressources en eau est indispensable.

Cette étude a pour objectif de montrer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau d'oued Medjerda (Nord- Est Algérien). Pour ce faire, diverses données climatiques sur des périodes allant de 19 à 38 ans et méthodes; Tests statistiques, indices centrés réduits, le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, analyse fréquentielle, chaînes de Markov, la loi de Maillet et le coefficient de tarissement, la construction des courbes intensités durées fréquences ont été utilisées. L'application de l'indice centré réduit et le filtre passe-bas de Hanning aux séries pluviométriques et hydrologiques a mis en évidence une variabilité climatique caractérisée par une alternance de phase humide dans la décennie 70, de phase sèche dans les décennies 80, 90 et d'une nouvelle phase humide dans la décennie 2000. Le long déficit pluviométrique a provoqué une baisse plus importante de l'écoulement de la Medjerda. Cette baisse est principalement occasionnée par une baisse des pluies du printemps et plus particulièrement celles de l'hiver. En outre, la fluctuation interannuelle de la pluie et des débits s'accompagne de ruptures de stationnarité dans leurs séries. Les tests statiques font apparaître des ruptures au niveau de la pluviométrie dont la majorité se localise dans les décennies 80 et 90. Les débits de la Medjerda sont affectés par des ruptures en 1988-89 et 1993-94. Une tendance à l'augmentation de la température et de l'évapotranspiration est observée dans ce bassin. L'historique des séries pluviométriques indique que la Medjerda assiste à un véritable décalage des zones pluviométriques. La variabilité de ces paramètres climatiques a eu des conséquences néfastes sur le bilan hydrologique, et a affecté la recharge souterraine réduisant ainsi, les disponibilités en eau des réserves de la région pendant les périodes de déficit pluviométrique. Ce pendant, cette sécheresse a été suivie par une tendance à l'augmentation, des pluies fortes journalières supérieures à 20 mm et les coefficients de tarissement ont connue une baisse ces dernières années d'où on observe une recharge rapide des nappes de la Medjerda. L'étude des chaînes de Markov a montré que, la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent deux années de suite, voire trois années ou plus. La probabilité d'avoir deux années sèches consécutives est plus importante dans les régions de Nord et du Sud, régions qui participent d'une façon considérable à la production agricole du pays. L'oscillation du Nord Atlantique pourrait être derrière ce changement dans le bassin d'étude. Finalement, pour une bonne gestion des eaux, de lutte contre la sécheresse et les inondations du bassin des modèles probabilistes ont été proposés.

Mots clés : Variabilité pluviométrique, Sécheresse, chaînes de Markov, variabilité climatique, Bassin versant Medjerda, Est de l'Algérie.

SUMMARY

Climate change in recent years has produced in arid semi arid areas of Algeria, periods of drought, which are characterized by deficient rainfall and very low flows of the wadi main watershed. During dry periods, surface water resources and, therefore, the stored volumes suffered a sharp decline. It is sometimes difficult to satisfy the demand for drinking water, and also that agriculture. To better manage such a situation, knowledge of climatic factors, and the study of his impact about water resources is essential. This study aims at show the impact of climate variability on the Oued water resources Medjerda (North East Algeria). To do this, diverse climatic data over periods ranging from 19 to 38 years old and methods; Statistical tests, reduced centered indices, the low-pass filter Hanning of order 2, frequency analysis, Markov chains, the law of Maillet and the drying coefficient, construction durations frequency intensity curves were used. The application of the reduced centered index and the low-pass filter Hanning to rainfall and hydrological series highlighted climate variability characterized by a wet phase alternation in the 70s, in the dry phase in the decades 80, 90 and a new wet phase in the 2000s. Along rainfall deficit caused a significant decrease in the flow of Medjerda. This decrease was mainly caused by a decrease in spring rains and particularly those of winter. In addition, the interannual fluctuation in the rain and flows is accompanied stationarity ruptures in their series. Static tests reveal ruptures in rainfall most of which locates in the decades 80 and 90. The flows of the Medjerda are affected by breaks in 1988-89 and 1993-94. A tendency to increasing temperature and evapotranspiration is observed in this basin. The history of rainfall data indicates that Medjerda witnessing a real shift in rainfall zones. And the results of the variability of climatic parameters in the region of the Oued Medjerda helped reduce water availability during periods of rainfall deficit. This variability has had a negative impact on the water balance, and affected groundwater recharge reducing the availability of water reserves in the region. This drought was followed by a rising trend, strong daily rainfall over 20 mm after years of failures, and recession coefficients have known a decline in recent years inversely volumes mobilized in watersheds in the region. These results have an advantage towards the resumption to increase groundwater recharge, and consequently water availability of reserves in the region. The study of Markov chains has shown that the drought is a frequent and recurrent phenomenon in two consecutive years or three years or more. The probability of having two consecutive dry years is more significant in the North and South regions, regions that participate in a considerable way to the country's agricultural production. The oscillation of the North Atlantic could be behind this change in the study area. Finally, for good water management, the fights against drought and flood basin of probabilistic models have been proposed.

Keywords: *rainfall variability, Dryness, Markov chains, Climate variability, watershed Medjerda, east of Algeria.*

Table des matières

Remerciements

Résumé

Table des matières.....1-5

Liste des figures 6-8

Liste des tableaux 9-10

Chapitre 1 : Introduction générale..... 11-16

1.1 Contexte général 11

1.2 Localisation du projet d'étude et problématique 13

1.2.1 A l'échelle nationale 13

1.2.2 A l'échelle régionale 13

1.3 Objectifs et plan d'étude 14

1.3.1 Objectifs 14

1.3.2 Plan d'étude 15-16

Chapitre 2 : Synthèse bibliographique 17-32

2.1. Introduction.....17

2.2 Changement climatique 19

2.3. Sécheresse 21

2.4. Sécheresse en Algérie.....23

2.5. Analyse fréquentielle des pluies 28

2.5.1. Rappel théorique sur le contrôle des données et l'analyse fréquentiel.....28

2.5.1.1. Hypothèses de l'analyse statistique.....28

2.5.1.2. Les grandes catégories des tests statistiques.....29

2.5.2. Définition de l'analyse fréquentielle.....30

Chapitre 3 : Présentation, Collecte des données de base et étude de la régionalisation de la zone d'étude 33-57

3.1. Introduction.....33

3.2. Présentation du site d'étude.....33

3.2.1. Présentation géographique.....33

3.2.2. Géologie.....35

3.2.3. Climat.....37

3.3. Présentation des données.....	40
3.3.1. Description de la base de données	40
3.3.2. Description du réseau hydrographique du bassin de Medjerda.....	42
3.3.3. Présentation des rivières.....	43
3.4. Etude d'homogénéité des séries	44
3.4. 1. Estimation des données manquantes.....	45
3.4. 2. La méthode du double cumul.....	46
3.5. Etude de la régionalisation par l'analyse en composante principale.....	50
3.5.1. Nombre d'axes à retenir	53
3.5.2. L'A. C. P	53
3.6. Analyses des résultats	53
Chapitre 4 : Etude de la persistance de la sécheresse et la relation entre la pluviométrie et l'Oscillation Nord-Atlantique.....	58-82
4.1. Introduction	58
4. 2. Variabilité interannuelles des pluies	59
4. 3. Etude de la tendance climatique.....	61
4. 3.1. Test de Spearman	61
4. 3.2. Test de Mann Kendall	61
4.3.3. Analyses des résultats	62
4.4. Etude de la variabilité intra-annuelle	63
4.4.1. La variabilité saisonnière	63
4.5. Etude de la persistance de la sécheresse.....	66
4. 5.1. Test de normalité	67
4. 5.2. Etude des séquences sèches	68
4.5.2.1. La méthode des quintiles	68
4.5.2.2. La méthode de l'analyse fréquentielle	70
4.5.2.3. Etude des séquences sèches par l'application des chaînes de Markov.....	71
4.5.2.3.1. Le processus de Markov d'ordre 1	71
4.5.2.3.2. Le processus de Markov d'ordre 2	72
4.5.3.1. Application du Modèle Markov d'ordre 1 sur nos stations.....	73
4.5.3.2. Application du Modèle Markov d'ordre 2 sur nos stations.....	73
4.6. Relation entre la Pluviométrie et l'Oscillation Nord-Atlantique.....	75
4.7. L'origine et la variabilité de l'oscillation nord-atlantique.....	76

4.8. Etude de la relation entre la pluviométrie du bassin et l'indice ONA	77
4.8.1. Première méthode Tableau de contingence	77
4.8.1.1. Choix des intervalles	78
4.8.2. Deuxième méthode évolution de la fréquence des années extrêmes.....	80
4.9. Conclusion	81
Chapitre 5 : Caractérisation de la variabilité climatique du bassin versant de la Medjerda	84-102
5.1. Introduction	84
5.2. Méthodologie	85
5.2.1. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles.....	85
5.2.2. Caractérisation spatiale des précipitations (Cartographie des indices pluviométriques).....	87
5.2.3 Analyse de la température de l'air	87
5.2.4. Caractérisation de la variabilité des précipitations mensuelles et journalières par rapport aux dates de rupture.....	88
5.3. Résultats	88
5.3.1. Tests d'homogénéité sur les pluies annuelles.....	88
5.3.2. Variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles.....	90
5.3.3. Variations de la température de l'air.....	92
5.3.4. Variation des pluies mensuelles.....	94
5.3.5. Les années de rupture marque le début d'hivers et la fin du printemps particulièrement pluvieux et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août.....	96
5.3.5. 1.Les excédents de décembre, janvier.....	96
5.3.5. 2.Les excédents d'avril, mai et juin.....	96
5.3.5. 3.Une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août.....	96
5.3.5. 4.Les déficits du mois de mars.....	97
5.3.6. Variation des fractions pluviométriques.....	97
5.4. Conclusion	101
Chapitre 6 : Évolution du régime hydrologique et détection de rupture.....	103-116
6.1. Introduction	103
6.2. Analyse des écoulements.....	103
6.2.1. Ressources annuelles en eau de surface disponibles.....	103
6.2.2. Ajustement statistique.....	104

6.3. Analyse de la variabilité temporelle des écoulements	105
6.3.1. L'écoulement annuel	105
6.3.2. Ecoulements moyens mensuels et saisonniers	107
6.3.2.1. Coefficient mensuel de Débits	108
6.3.3. Ressources mensuelles en eau de surface disponibles.....	112
6.4. Fluctuations hydro climatologiques dans les bassins versants	113
6.4.1. Méthodologie appliquée	113
6.4.1.1. Bassin de la Medjerda Nord	114
6.4.1.2. Bassin de Medjerda Méllègue Sud	115
6.5. Conclusion.....	116
Chapitre 7 : Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau.....	117-131
7.1. Introduction	117
7.2. Les régimes des débits et leur évolution avec les précipitations.....	117
7.2. 1.Méthode de la variable centrée réduite	117
7.2. 2.Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2.....	118
7.2. 3.Méthodes statistiques de détection des ruptures.....	122
7.2. 3.1.Test de PETTIT	123
7.3. Bilan Hydrique	123
7.3.1. Evolution interannuelle des paramètres climatiques.....	124
7.4. Etude du phénomène de tarissement par la loi de maillet.....	126
7.4. 1. Evaluation du tarissement dans les bassins versants de Medjerda Mellègue.....	126
7.4. 2. Analyse des courbes de tarissement	128
7.4. 2.1 Coefficient de tarissement et volume d'eau mobilisé par les aquifères.....	128
Cas de l'oued de la Medjerda	128
7.5. Conclusion	130
Chapitre 8 : Concepts des modèles probabilistes pour le bassin d'oued Medjerda	132-141
8.1. Introduction	132
8.2. Distribution statistique des pluies extrêmes	132
8.3. Estimation des probabilités des événements hydrologiques.....	134
8.4. Les pluies torrentielles en saison humide (de Septembre à Avril).....	135
8.5. Les pluies torrentielles en saison sèche (de Mai à Août).....	136
8.6. Analyse intensité – durée – fréquence : loi de Montana.....	137

8.6.1. Les Pluies de longues durées.....	137
8.6.2. Les Pluies de courtes durées	139
8.6.3. Application à l'événement pluvieux du 22 Août 2002 à Souk-Ahras	141
8.7. Conclusion	141
Chapitre 9: Conclusions et recommandations	142-145
9.1. Conclusions	142
9.2. Recommandations.....	145
Références Bibliographiques.....	146-159
Annexe	160-179

Liste des figures

Figure 2.1: Principales étapes de l'analyse fréquentielle.....	31
Figure 3.1 : Situation du bassin versant de Medjerda Nord-est Algérie.....	34
Figure 3.2 : Coupe géologique du bassin versant de Medjerda Nord-est Algérie.....	36
Figure 3.3 : Profil en long de l'oued Medjerda	37
Figure 3.4 : Isohyètes moyennes annuelles au niveau de la région d'oued Medjerda (Souk-Ahras au Nord et Tébessa au Sud).....	38
Figure 3.5 : Précipitations moyennes mensuelles (mm), écart type, coefficient de variation %, médiane et module de a)Tébessa, b) Souk-Ahras.....	39
Figure 3.6 : Stations pluviométriques retenues pour l'étude du bassin de la Medjerda	42
Figure 3.7: réseau hydrographique du bassin de la Medjerda et stations hydrométriques retenues pour l'étude.....	43
Figure 3.8 : Test d'homogénéité des stations de la région de Souk-Ahras.....	47
Figure 3.9 : Test d'homogénéité des stations de la région d'Ouenza.....	48
Figure 3.10 : Test d'homogénéité des stations de la région de Tébessa.....	49
Figure 3.11 : Test d'homogénéité des stations de la région de Messkiana.....	50
Figure 3.12 : Test d'homogénéité des stations de la région d'Ain-Dahla.....	50
Figure 3.13 : Cartographie de la première composante principale.....	55
Figure 3.14: Cartographie de la deuxième composante principale.....	56
Figure 3.15: Cartographie de la troisième composante principale.....	56
Figure 3.16: Cartographie des trois composantes principales.....	57
Figure 4.1: Variation interannuelle des précipitations (Souk-Ahras, Tébessa, Ouenza).....	60
Figure 4.2 : Etude de la tendance des trois stations (Souk-Ahras, Tébessa, Ouenza).....	63
Figure 4.3 : Evolution des totaux d'automne avec leur moyenne mobile dans les trois stations (Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza).....	64
Figure 4.4 : Evolution des totaux hivernaux et printaniers avec leur moyenne mobile dans les trois stations (Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza).....	65
Figure 4.5 : Ajustement à une loi normale pour les stations de la zone d'étude.....	67
Figure 4.6 : Courbes de fréquences des trois stations.....	71
Figure 4.7: représentation des deux cas de l'indice d'oscillation nord-atlantique ONA+ et ONA-.....	76

Figure 4.8: la variabilité séculaire de l'indice d'oscillation nord-atlantique	77
Figure 4.9: Ajustement à une loi normale des variables centrées réduites de l'indice d'oscillation nord-atlantique.....	78
Figure 4.10: représentation des seuils de l'indice ONA.....	78
Figure 4.11: représentation des seuils de variables des totaux annuels.....	79
Figure 4.12: Moyennes mobiles du pourcentage annuel des 16 stations ayant connu une année humide ou très humide (courbe) et de l'indice ONA calculé de septembre à février (histogrammes) sur la période 1972-2007.....	80
Figure 5.1: Courbe de la série pluviométrique de Tébessa (dates de rupture: 1974 et 1999)..	90
Figure 5.2: Ellipses de contrôle des pluies annuelles (1969 - 2007).....	90
Figure 5.3: Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Medjerda (1971-2007).....	92
Figure 5.4 : Variations interannuelles de la température de l'air : a- à Souk-Ahras (1969-2007) ; b- à Tébessa (1978-2007).....	93
Figure 5.5 : Diagrammes Ombro-thermiques: a- à Souk-Ahras; b- à Tébessa.....	94
Figure 5.6: Précipitations mensuelles moyennes avant et après rupture aux stations de Souk-Ahras, Ouenza, Boukhadra et Tébessa.....	95
Figure 5.7: Changements de moyenne (CM) pour différentes fractions pluviométriques avant et après la rupture (Pj : précipitations journalières (< 20 mm, 20 à 40 mm, > 40 mm)).....	99
Figure 5.8: Valeurs annuelles de différentes fractions pluviométriques (précipitations journalières < 20 mm, de 20 à 40 mm et > 40 mm).....	100
Figure 6.1: Ajustement à la loi log-normale des lames d'eau écoulées annuelles : a) à Souk-Ahras ; b) à Ouenza.....	104
Figure 6.2 : Variation du débit moyen annuel à la station de Souk-Ahras.....	106
Figure 6.3 : Variation du débit moyen annuel à la station d'Ouenza.....	107
Figure 6.4 : Variation du débit moyen annuel à la station de Morsette.....	107
Figure 6.5 : Répartition des débits moyens mensuels à la station de Souk-Ahras.....	109
Figure 6.6 : Répartition des débits moyens mensuels à la station d'Ouenza.....	109
Figure 6.7 : Répartition des débits moyens mensuels à la station de Morsette.....	110
Figure 6.8 : Répartition des débits moyens mensuels à la station d'Ain-Zerga.....	110
Figure 6.9: Variations annuelles du coefficient hydro climatique moyen (Chm) du bassin d'Oued Medjerda.....	114

Figure 6.10: Variations annuelles du coefficient hydro climatique moyen (Chm) du bassin d'Oued Mèllègue.....	115
Figure 7.1: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Medjerda à la station de Souk-Ahras de 1969 à 2007.....	119
Figure 7.2: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Mèllègue à la station d'Ouenza de 1969 à 2007.....	121
Figure 7.3: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Chabro à la station Tébessa de 1969 à 2001.....	122
Figure 7.4: Variation interannuelle de la pluviométrie à la station de Souk-Ahras.....	125
Figure 7.5: Evolution des paramètres climatiques à la station de Souk-Ahras.....	125
Figure 7.6: Variation du bilan hydrique à la station de Souk-Ahras.....	126
Figure 7.7: Variation interannuelle des écoulements à la station d'oued Medjerda.....	126
Figure 7.8 : Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé d'oued Medjerda.....	129
Figure 7.9 : Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé d'oued Mèllègue.....	130
Figure 8.1 : Ajustement de loi de Gumbel aux maxima annuels des pluies journalières de Souk-Ahras.	134
Figure 8.2 : Ajustement de loi de Gumbel aux cumuls des pluies journalières mensuelles torrentielles (saison humide).....	136
Figure 8.3 : Hauteur de pluie en fonction de la durée pour une période de retour donnée ; anamorphose de la loi de Montana ($h=a t^n$) en une fonction affine ($\log h = \log a + n \log t$), années 1969-2005.....	138
Figure 8.4 : Courbes-Intensités-Durées-Fréquences loi de Montana	139
Figure 8.5: Courbes-Intensités-Durées-Fréquences pluies de courte durée	140

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Corrélation entre les précipitations mensuelles de chaque mois.....	39
Tableau 3. 2: Liste des stations pluviométriques retenues pour l'étude.....	41
Tableau 3.3 : Stations hydrométriques retenues dans l'étude.....	44
Tableau 3.4: Résultats de l'Analyse en composantes principales.....	54
Tableau 4.1 : Analyse des précipitations interannuelles a Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza (période d'étude 1969-2007).....	59
Tableau 4.2 : Test statistique de tendance des séries pluviométriques.....	62
Tableau 4.3 : Analyses des moyennes hivernales et printanières sur les deux périodes; 1969- 1975 / 1976-2007 stations de (Tébessa et Ouenza) et 1969-1976 / 1977-2007 station de Souk- Ahras.....	65
Tableau 4.4 : Seuils des années sèches, très sèches, humides et très humides ; par la méthode des quintiles, période (1969-2007).....	68
Tableau 4.5 : Statistiques des années sèches et pluvieuses par la méthode des quintiles.....	69
Tableau 4.6 : Statistiques des années sèches et pluvieuses pour chaque décennie	69
Tableau 4.7 : Classe de sécheresse en fonction des fréquences.....	70
Tableau 4.8 : Processus de Markov d'ordre 1.....	72
Tableau 4.9 : Processus de Markov d'ordre 2.....	72
Tableau 4.10: Processus de Markov d'ordre 1 pour chaque station pour la période (1969- 2007).....	73
Tableau 4.11: Processus de Markov d'ordre 2 pour chaque station pour la période (1969- 2007).....	74
Tableau 4.12 : Table de contingence entre l'indice d'oscillation nord-atlantique et les totaux annuels de la pluviométrie de la zone d'étude.....	79
Tableau 5.1 : Principales dates de rupture des séries pluviométriques.....	89
Tableau 5.2: Températures mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa.....	93
Tableau 5.3: Pluies moyennes mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa (1913-1938 et 1969-2007).....	95
Tableau 5.4: Différentes fractions pluviométriques journalières des trois stations dont les chroniques sont disponibles.....	98
Tableau 6.1: Evaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes.....	103
Tableau 6.2 : Caractéristiques hydrologiques des stations retenues.....	106
Tableau 6.3 : Répartition des débits mensuels des oueds de la Medjerda.....	111
Tableau 6.4 : Disponibilités mensuelles moyennes et extrêmes en eaux de surface (10^6 m^3) des bassins des oueds Medjerda, Mellegue, Zerga et Chabro.	112

Tableau 7.1 : Différents découpages obtenus pour les trois stations.....	120
Tableau 7.2 : Test statistique, années de rupture et variation dans les séries hydrologiques du bassin de la Medjerda.....	123
Tableau 7.3: Bilan hydrique à la station de Souk-Ahras.....	124
Tableau 8.1: Estimation des pluies journalières maximales annuelles fréquentielles (à 95 % de chance).	135
Tableau 8.2 : Les temps de retour des pluies journalières maximales des années 1983/1984 et 1990/1991, 2002/2003, Souk-Ahras.....	135
Tableau 8.3 : Estimation du cumul des pluies journalières mensuelles torrentielles annuelles fréquentielles (à 95 % de chance) saison humide.....	136
Tableau 8.4 : Estimation du cumul des pluies journalières mensuelles torrentielles annuelles fréquentielles (à 95 % de chance) saison sèche.	137
Tableau 8.5: Estimation des paramètres a et n à partir des droites de régression.	138

Chapitre 1

Introduction générale

1.1. Contexte général

L'optique d'un éventuel changement climatique fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches scientifiques. Le changement climatique est un défi global qui exige une réponse mondiale. Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990, la plus chaude depuis dix siècles (GIEC, 2008). Le réchauffement climatique et ses variations régionales vont avoir un certain nombre de conséquences physiques sur l'environnement. Plusieurs de ces conséquences concernent le cycle des eaux, océans, glaciers, nuages et pluies. Cependant toutes les régions ne seront pas touchées de la même manière par les changements climatiques. Mais qu'en est-il des incidences de l'évolution du climat sur les régions du bassin méditerranéen ?

Une atmosphère plus chaude modifie les schémas de précipitations et une variabilité accrue du climat. Il y aura particulièrement une augmentation en fréquence et en intensité des phénomènes extrêmes, ce qui entraînera une succession plus nette des années de grande sécheresse.

Plusieurs simulations climatiques indiquent que la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80 (GIEC, 2007 ; GIEC, 2008 ; Blöchliger et Neidhöfer, 1998 ; Kadi, 1995) est en particulier l'Algérie (Djellouli, et Daget, 1993 ; Talia et Meddi, 2004 ; Meddi et Meddi, 2007 ; Zeineddine, 2011 ; Hirche, et al, 2007 ; Zeineddine, et al , 2013) avec l'apparition fréquente des phénomènes météorologiques extrêmes et catastrophes naturelles (Hoff et Rambal, 1999 ; Blöchliger et Neidhöfer, 1998 ; Zeineddine, 2011 ; Zeineddine, et al , 2013 ; Saadaoui et Ben Sakka , 2007 ; La Chaîne Météo, 2013).

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.

Du fait qu'elle soit située dans le Sud du bassin méditerranéen, l'Algérie reste une région touchée par ces changements climatiques et catastrophes naturelles. Cependant 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 (Khetab et al, 2002). Cette sécheresse a été suivie par de nombreuses inondations qui ont été marquées sur tout le territoire algérien :

- 20 Octobre 1993 (Ouest algérien): 22 décès et 14 blessés à Qued Rhiau.
- Octobre 1994 (plusieurs régions du pays): 60 décès et des dizaines de disparus au cours de dix jours d'inondations.
- 10-11 Novembre 2001 (Bab El Oued – Alger): pluies diluviennes, 733 victimes, 30000 habitants sans abris et importants dégâts matériels.
- 22 Août 2002 (Souk-Ahras Est algérien) : 2 décès durant l'évènement, et dégâts matériels importants.
- Des inondations et dégâts matériels importants à Tébessa : Octobre 2008.
- 10 Octobre 2008 (Ghardaïa 600 km au Sud d'Alger) : 60 décès, 48 blessés et des dégâts considérables.

1.2. Localisation du projet d'étude et problématique

1.2.1. A l'échelle nationale

Les régions de l'Algérie souffrent du manque d'études statistiques sur la base desquelles, les mesures structurelles et non structurelles de protection sont dimensionnées, et d'après l'étude effectuée par Senhadji et Senouci. (2007), Amyay et al., (2012), l'Algérie s'attend à une réduction de l'ordre de 10 % en termes de précipitation dans les prochaines années et un déficit en apport en eau superficielle de 15 %. Ils estiment aussi que l'amorce de périodes beaucoup plus humides et des orages comme ceux qui ont caractérisé les régions de Bab El Oued, de Ghardaïa ou Bechar seront de plus en plus fréquents.

L'Algérie est confrontée à un manque d'eau important dû à la semi-aridité de son territoire, aux faibles précipitations, et à la sécheresse qui sévit d'année en année face à des besoins qui ne cessent d'augmenter. L'eau devra être mobilisée et préservée, à défaut tous les efforts de développements seront stoppés. En effet, sur les 90 milliards de m³ qui précipitent en moyenne chaque année, seulement 12 milliards représentent les ressources en eaux superficielles et les $\frac{2}{3}$ susceptibles d'être mobilisées (Matari et al, 1999). Les possibilités de mobilisation des eaux souterraines sont évaluées à $1,8 \cdot 10^9$ de m³ dans les bassins du nord du pays et sont actuellement exploitées à 90 %.

Et à la grande variabilité interannuelle et saisonnière des précipitations, on observe une forte irrégularité des apports liquides avec de violentes crues et des périodes de basses eaux qui peuvent persister sur plusieurs mois consécutifs, entraînant une baisse sensible de la production agricole. Donc, il est important d'identifier les différentes modifications du régime pluviométrique en Algérie en vue d'étudier leurs impacts sur l'évolution du régime hydrologique et des écoulements souterrains.

De ce fait, la question à laquelle cette étude essaye d'apporter une ou plusieurs réponses est : comment peut-on situer la diminution de la pluviométrie algérienne observée depuis plus de deux décennies au sein de la chronologie pluviométrique de ce siècle ?

1.2.2. A l'échelle régionale

Pour évaluer le changement climatique en Algérie, nous tenterons à travers cette étude, d'évaluer le cas de bassin versant de la Medjerda située dans la partie Nord Est de l'Algérie, sur la base des données hydro- pluviométriques allant du 1969 à 2007. Dans cette zone on a

observé au cours de ces dernières décennies une irrégularité de la variabilité pluviométrique avec l'augmentation systématique des pluies fortes en été. Des pluies diluviennes en août 2002 sont abattues sur les villes de Souk-Ahras et Tébessa provoquant 3 décès durant l'évènement, et dégâts matériels importants. Aussi on a observé récemment une baisse des volumes des apports stockés dans les barrages pendant la saison hivernale, ce qui a rendu la disponibilité de l'eau potable varie de une à quelques heures par jour pendant une à deux fois par semaine. En plus le bassin de la Medjerda souffre du manque d'étude statistique et climatique, alors qu'on sait que l'étude de la variabilité climatique et ses impacts sur les ressources en eau revêt une importance capitale en hydrologie, surtout en ce qui concerne la gestion des ressources en eau et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et l'étude des aménagements hydro-agricoles.

1.3. Objectifs et plan de l'étude

1.3.1 Objectifs

En hydrologie, l'étude de la sécheresse hydro-pluviométrique, la caractérisation de la variabilité climatique et les applications de l'analyse fréquentielle des pluies sont diverses, et incluent principalement :

1. L'analyse de l'aléa pluviométrique et de sa fréquence d'occurrence, visant la compréhension des phénomènes et le diagnostic du niveau de risque ;
2. L'analyse des modifications des conditions de précipitation et d'évapotranspiration avec le changement climatique, visant les impacts visibles sur les débits des rivières ;
3. L'évaluation de la pluie de projet utilisée dans le dimensionnement des ouvrages.
4. La prévision des situations à risque, qui joue un rôle important dans le contrôle des inondations et dans la gestion des eaux d'un bassin versant.

Le changement climatique a un impact sur ces applications citées ci-dessus. L'étude de ce problème se présente dans cette recherche par une : Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau « cas d'Oued Medjerda » thème retenu pour ce travail qui vise à :

- A. Analyser les séries hydro-pluviométriques;

- B. Evaluer l'effet de leur diminution, progressive ou non, en fonction des changements climatiques;
- C. Protéger les vies humaines et les biens contre les inondations et
- D. Assurer une bonne gestion des eaux pour le confort des citoyens.

1.3.2 Plan d'étude

En plus de l'introduction (premier chapitre) et les conclusions générales (neuvième chapitre), la thèse s'articule en sept chapitres :

- **Chapitre 2** présente une synthèse bibliographique qui donne un aperçu sur le changement climatique, et les conséquences de ce dernier sur le cycle hydrologique, en mettant plus de lumière sur le phénomène sécheresse. Comme elle cite l'intérêt de certaines méthodes pour la détection du changement climatique, de la sécheresse et l'analyse fréquentielle.
- **Chapitre 3** présente les données de base avec un aperçu sur le climat et la géologie de la zone d'étude. Il présente aussi l'étude de l'homogénéité des séries pluviométriques, de sa régionalisation par l'analyse en composante principale.
- **Chapitre 4** présente les méthodes et leurs applications dans l'étude de la persistance de la sécheresse sur la zone d'étude. L'analyse de la récurrence et de la persistance de ce phénomène, par des méthodes de chaîne de Markov cherche à établir une estimation des probabilités qui pourrait contribuer à la planification de stratégies de mobilisation, et de gestion des ressources en eau. L'oscillation Nord Atlantique (ONA) nous concerne beaucoup plus directement, car elle étend son influence sur l'Afrique du Nord et d'autre région du monde comme l'Europe; pour cette raison, il nous a paru très intéressant d'analyser l'oscillation Nord Atlantique (ONA) pour faire le point sur la nature de relation entre la sécheresse rencontrée durant les dernières décennies et l'oscillation nord-atlantique sur l'Est Algérien « cas du bassin de la Medjerda ».
- **Chapitre 6** présente les méthodes statistiques les plus utilisées ainsi que, leur application dans le cas de la zone de la Medjerda, sur les aspects de la stationnarité de la série pluviométrique et la détection d'éventuelles variations brutales ou

progressives des conditions climatiques. Aussi, la spatialisation des irrégularités des précipitations a été approchée par la représentation de la cartographie de l'indice pluviométrique. Des analyses statistiques et graphiques ont permis de caractériser les variations de la température de l'air de la zone d'étude. Une comparaison sur l'historique des pluies et des températures du bassin d'étude a été utilisée, afin d'analyser la tendance de l'évolution de ces variables climatiques de la période (1913-1938) à celle de la période (1969-2007).

- **Chapitre 7** présente une évaluation des ressources en eau superficielles, l'étude et l'analyse des séries hydrométriques menées sur une période de temps assez longue afin d'évaluer la sensibilité des rivières de ce bassin aux variations du climat.
- **Chapitre 8** poursuit l'analyse de la variabilité des paramètres climatiques dans la région de l'oued Medjerda, et son impact sur la réduction des ressources en eau disponibles pendant les périodes de déficit pluviométrique.
- **Chapitre 9** présente les méthodes de construction des modèles probabilistes empiriques et leurs applications pour le cas des données du Nord de la Medjerda.

Chapitre 2

Synthèse bibliographique

2.1. Introduction

A la fin de ce siècle, le changement climatique est devenu l'un des sujets d'actualité. On lit souvent dans la presse les titres comme: "Le climat change t-il" ? "La terre se réchauffera t-elle" ? etc...

Ce genre de questions est souvent posé, vu l'impact de ces changements sur le plan socio-économique de plusieurs pays, en particulier ceux du globe les moins développés au plan technique, et où l'économie est fondée sur l'agriculture, généralement non irriguée. Dans certains pays en développement, en Asie par exemple les inondations comptent parmi les événements météorologiques les plus dommageables aux communautés. Quant à la sécheresse, c'est un phénomène qui s'est produit en de nombreux endroits du globe, avec des ampleurs et des durées variables. Au delà de la grande polémique sur les causes réelles des dérèglements climatiques contemporains (Duplessy, 2001 ; Leroux, 2007 ; Svensmark et Friis-Christensen, 2007), l'augmentation des températures qui est observée par une grande majorité de stations dans le monde, constitue un fait indéniable et confirme ainsi la réalité du réchauffement climatique global (Christensen et al., 2007). Ainsi la décennie 2001-2010 et l'année 2010, à égalité avec 2005 et 1998, sont-elles considérées par l'OMM (2013) comme les plus chaudes à l'échelle mondiale depuis que l'on dispose de relevés météorologiques.

Parallèlement à cette hausse, une augmentation probable des précipitations est attendue (Trenberth et al., 2007). Ces dernières années, les pluies ont occasionné de violentes inondations un peu partout dans le monde. En juillet 2007, la Grande-Bretagne a fait face à ses plus graves inondations depuis plus de soixante ans. En 2008, les pluies de mousson ont été extrêmement fortes en Inde. En 2009, dans cette même région du monde, c'est au Pakistan que les pluies de mousson ont été particulièrement dévastatrices. En 2010, l'Australie a connu

les plus grandes inondations de son histoire, avec près de quarante villes du Nord-Est du pays touchées et plus de 200000 personnes affectées (Le Monde, 2011). En 2011, la Thaïlande a subi les plus graves inondations jamais observées dans cette partie du monde. Enfin, en 2013, l'Inde a fait face une nouvelle fois à une mousson exceptionnelle (Bossy, 2013), par sa rapidité de déplacement et par sa violence (plus de 5000 personnes ont péri dans des inondations meurtrières), tandis que l'Europe centrale était touchée par des inondations d'une ampleur jamais observée depuis près 500 ans (La Chaîne Météo, 2013), conséquences des très fortes pluies tombées sur l'Autriche, l'Allemagne, la Hongrie et la Tchéquie.

Si la recrudescence de tels évènements est bien réelle, ces épisodes peuvent cependant, suivant le degré de leurs intensités, être ressentis d'une manière tout à fait différente d'une région à une autre du globe (Narrant, 2004; Douguédroit et Bridier, 2007 ; Rothschild et Beltrando, 2007 ; Lamarre, 2008).

L'Afrique du Nord a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, tels que ceux des années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. Ainsi, l'évolution des températures (hausse des minima et des maxima) est conforme à la situation mondiale (Sebbar et al., 2012 ; Amraoui et al., 2011). Les pluies enregistrées dans cette partie du monde s'inscrivent aussi dans les évolutions générales (Sebbar et al., 2011 ; Nouaceur, 2010).

En plus, après deux décennies de sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée en Algérie et dans tout le Maghreb (Amyay et al., 2012). Le retour des pluies de la dernière décennie est une chance pour les agricultures, il n'en est pas de même pour les citadins. En effet, les fortes averses provoquent des inondations et causent de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines. Les pluies, qui avaient été tant attendues, sont ainsi devenues de plus en plus redoutées.

La sécheresse des années 80 jusqu'à nos jours a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau (Khaldi, 2005 ; Djellouli, 1993; Laborde, 1993; Meddi et al, 2007; Hirche et al, 2007 ; Meddi et Hubert, 2003 ; Mebarki, 2010).

Etudier l'impact négatif de la variabilité climatique sur les ressources en eau est devenue un impératif de plus en plus pressant en Algérie.

Cette synthèse bibliographique sera articulée en trois points :

- La première partie présente une synthèse bibliographique sur la recherche récente concernant le changement climatique et son impact sur le cycle de l'eau.
- Dans la deuxième partie, nous allons procéder à une étude bibliographique concernant la sécheresse, tout en mettant le point sur; la sécheresse en Algérie et les méthodes utilisées pour la détection de la sécheresse, afin de, préparer et d'élaborer des plans d'intervention pour la réduction des impacts potentiels de la sécheresse en Algérie.
- La troisième partie traite les étapes de l'analyse fréquentielle qui revêt une importance primordiale en hydrologie.

2.2. Changement climatique

Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990, la plus chaude depuis dix siècles (GIEC, 2008). Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs conséquences socio-économiques.

Parmi ces manifestations on peut citer :

- La sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète, surtout les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, depuis les années 70 (Sircoulon, 1976).
- Les récents phénomènes d'El Niño (Vandiepenbeeck M., 1998).
- Les constatations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) sur le réchauffement de la planète évalué à 0.5 °C depuis la moitié du siècle dernier (Cantat, 1995). La moyenne décennale des températures (2001 – 2010) représente la moyenne la plus élevée depuis le début des relevés des instruments météorologiques (OMM, 2013).

Parmi les résolutions communes aux études effectuées par la communauté scientifique (GIEC, 2008), il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point (WMO, 1966; Lubès et al, 1994; et Cavadias., 1994).

Les changements climatiques supposent la variation à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur des périodes de longue durée. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence. Le suivi du cycle climatique de l'eau, reconnu comme l'un des manifestations majeures du

climat, permet d'appréhender certains aspects de l'évolution de ce dernier. Ainsi, Ouarda et al., (1999) ont indiqué que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont:

- Le débit des rivières,
- Le niveau des lacs,
- Les précipitations,
- Les températures de l'air et de l'eau,
- La date de rupture du couvert de glace et sa durée et,
- Le niveau des eaux souterraines.

Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser (Ouarda et al, 1999):

- Le changement de la moyenne et
- Le changement de la variance.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté :

- Diminution de la pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1998; Paturel et al., 1995; Paturel. et al., 1997; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998; Moron Vincent, 1994 ; Servat et al., 1999),
- Diminution du nombre de jours de pluie (Paturel J.E. et al., 1997; Servat et al., 1997; Houndénou et Hernandez., 1998; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998; Servat et al., 1999),
- Diminution des débits des rivières (Sircoulon, 1987; Opoku-Ankomah et Amisigo., 1998),
- Diminution des niveaux des lacs (Sircoulon, 1987),
- Fortes intensités de pluies (Houndénou et Hernandez, 1998; Tarhule et Woo, 1998, GIEC, 2008),
- ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse (Bello, 1998 ; Servat et al., 1999).

Assani (1999) a mis en évidence, à l'aide du filtre récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 :

- La succession de phases sèches et humides à Lubumbashi (Congo-Kinshasa);

- La dernière phase sèche en date a commencé vers les années 1980 et se prolonge jusqu'à nos jours ;
- Malgré cela, avec les tests il n'a pas détecté de rupture de la stationnarité dans la série chronologique étudiée alors que ;
- Les précipitations sont significativement corrélées aux indices d'oscillation australe pendant la saison de pluies.

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

- 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;
- Certaines zones sont plus affectées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale;
- Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

Les études effectuées par GIEC (2008) sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, prévoient :

- Une augmentation des températures et;
- Une accentuation de la variabilité climatique.

Cela s'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité, de la répartition des précipitations, et une amplification des phénomènes extrêmes tels que l'inondation et la sécheresse. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, dans le temps et dans l'espace, présagent que cette tendance est en passe de devenir structurelle en relation avec le réchauffement climatique.

2.3. Sécheresse

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses (Obassi, 1994). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson et al. 1997). En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse grave en Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes. Au sud de

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

L'Hôte et al. (2002) montrent, suite à une analyse d'un indice des précipitations annuelles au Sahel ouest africain, que la sécheresse n'est pas encore terminée en fin de l'année 2000. Cependant, les modifications climatiques subies par l'Afrique durant le XX^{ème} siècle sont très nombreuses et n'ont pas les mêmes emprises (Paturel et al, 2004). En effet, pour l'Afrique Centrale, les modifications les plus importantes sont survenues au cours de la première moitié du siècle avec une augmentation de la pluviométrie annuelle. Quant à l'Afrique de l'Ouest, une diminution très marquée de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 a été détectée. Elle a de plus une étendue qui ne semble pas avoir eu d'équivalent au cours du XX^{ème} siècle. Les pays comme le Ghana, le Togo, le Bénin et la partie maritime du Nigeria n'ont connu aucun changement notable. L'Afrique sahélienne a été la plus sujette à de nombreux changements au cours du siècle: dans son ensemble, elle a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1940 puis une diminution vers 1970; sa partie centrale a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1919 puis une diminution vers 1970.

Les travaux de Aka et al, (2010) et Ardoïn-Bardin, (2004) ont signalé par le test de PETTIT, l'existence d'une rupture préférentielle autour des années 1970 au niveau des grands cours d'eau du Côte d'Ivoire. L'année 1970 a été aussi relevée comme année de rupture par Mahé et al., (2001) sur les débits du Bani à Douna au Mali, avec une diminution de 68 %. Ils mettent aussi, en évidence que les ruptures hydrologiques sont en phase avec les ruptures pluviométriques. Cette concordance des dates de rupture montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.

Ces années de rupture sont aussi en phase avec le découpage donné par le filtre passe-bas de Hanning de la station de Grand-Lahou. Ces années s'insèrent dans la période de rupture de la plupart des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire, à savoir 1966-1971 (Servat et al., 1999). Ces ruptures montrent aussi que la région de Grand-Lahou s'inscrit globalement dans la fluctuation du régime pluviométrique observée entre la fin des années 1960 et le début des

années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale (Olivry, 1997 ; Paturel et al., 1997, 1998 ; Servat et al., 1998 et 1999).

Kouame (2011) a signalé une tendance des coefficients de tarissement à la hausse à partir de la rupture de 1970 dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest du Côte d'Ivoire. Les volumes mobilisés ont évolués inversement aux coefficients de tarissement. Ces volumes ont régulièrement baissés depuis l'année 1986 qui est caractérisée par une très faible pluviométrie. En effet, l'année 1986 est l'année qui a été marquée par une sécheresse particulièrement intense dans la région de Soubré. Cette sécheresse a contribué à la réduction des réserves d'eau de la région et a même affecté la recharge souterraine, ce qui a contribué à rendre les volumes mobilisés dans les différents bassins versants de la région. Les études de Lubes-Niel et al., (1998) ont également observé une augmentation des coefficients de tarissement dès 1969 sur cinq sous-bassins du fleuve Niger. Ces constatations ont également été faites par Nicholson, (1994) qui a signalé ce phénomène sur les bassins versants du Tchad. Vissin (2007) a fait ce même constat dans le bassin béninois du fleuve Niger.

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

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

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

2.4. Sécheresse en Algérie

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

En Algérie, en considérant les stations du nord Demmak et al, (1994) par une méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et à la moyenne de longue durée (1922-1992), 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 (1995), donnent l'évolution d'un indice de sévérité de la sécheresse sur la même région et relèvent l'occurrence de sécheresse sévères et généralisées durant des années très isolées : 1937, 1961, 1970.

En étudiant aussi les données de 120 postes pluviométriques du Nord de l'Algérie, Laborde (1993) a mis en évidence par une analyse en composante principale une succession de quatre phases pluviométriques :

- Une longue phase où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'ouest et au centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11 %.
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972 environ.
- Une longue phase sèche qui s'affirme dès la fin de 1973.

Matari et al, (1999) 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.

Khaldi en 2005 a étudié la sécheresse sur les stations pluviométriques du nord-ouest algérien. Il abouti aux résultats suivants :

- A partir des variables centrées réduites des totaux annuels, l'analyse a mis en évidence la succession de deux phases, un long épisode globalement pluvieux qui s'est étendu entre le début des années 50 et la fin des années 70, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 80 et qui persiste jusqu'à son étude ;
- Les pluies d'hiver durant la décennie 1990-2000 ont connu généralement une baisse pour les stations d'étude ;
- Les résultats obtenus par l'étude de la sévérité de la sécheresse, en utilisant différentes méthodes comme celles des quintiles et des Terciles, confirment la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les deux décennies 1980-1990-2000 pour la région d'étude ;
- Il montre aussi, que le modèle Markovien ajuste bien les séquences pluvieuses, par contre l'ajustement des séquences sèches par ce modèle montre qu'il existe une grande différence entre les fréquences calculées et les fréquences théoriques surtout lorsque nous allons vers des seuils plus grands ;
- L'analyse de l'étude de la relation entre l'ONA et la pluviométrie à partir de la corrélation montre qu'il y a un lien entre cette oscillation et la pluviométrie dans cette région d'étude.

Meddi et Hubert (2003) et Khettab (2001) mettent, par des études de la sécheresse aux stations du nord de l'Algérie, en évidence une diminution pluviométrique au cours des dernières décennies. 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,...).

Mebarkie (2010) signale par une étude sur les apports des cours d'eau de l'est algérien que 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sécheresse hydrologique (faible hydraulicité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002.

Khoualdia et Djebbar, (2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014) mettent en évidence par des études de la sécheresse aux stations du nord-est de l'Algérie (région de la Medjerda) le suivant :

- Diminution pluviométrique au cours des dernières décennies (1970-1980-1990-2000) ;
- Diminution des débits de la rivière de la Medjerda durant ces mêmes décennies ;
- Augmentation de la température et de l'évapotranspiration durant ces mêmes décennies ;
- Fortes intensités de pluies ;
- Diminution des apports liquides au niveau du barrage d'Ain Dalia, et les années 1988-1989, 1993-1994 et 2001-2002 ont connue une baisse jamais atteinte depuis sa mise en service.

D'autres études menées par Khettab et al., (2002) sur la sécheresse en Algérie montrent que, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'Ouest et du Centre se sont asséchés. Ce ci est moins ressenti à l'Est de l'Algérie. C'est ainsi que, la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus difficile à gérer. L'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie.

Récemment, Meddi et al., (2009) ont montrés que, suite a une étude des chaînes de Markov appliquée sur les stations pluviométriques de l'Algérie du Nord,

- pour avoir une année non sèche après une année sèche, la probabilité est plus importante au centre du pays qu'elle est à l'ouest et,
- pour avoir deux années sèches successives, la probabilité est plus importante à l'ouest qu'au centre.

Ces résultats des différentes approches méthodologiques des principaux indices de la sécheresse aident à une description d'état de préparation de gestion de la sécheresse en Algérie. Par ailleurs, plusieurs efforts pour le développement de nouvelles méthodologies d'estimation et de quantification des différents aspects liés à la sécheresse ont été déployés, tel que les différences spatiales de la sécheresse (Beersma et Buishand, 2004), la prédiction des sécheresses par les indices de la circulation atmosphérique (Lloyd et Saunders, 2002), et la mitigation des effets de la sécheresse (WMO, 2000). Cependant, plus d'efforts ont été fournis

pour développer des indices de la sécheresse, permettant une identification précoce de son intensité et son ampleur. Ces indices sont primordiaux pour l'analyse et la planification continue des sécheresses dans le temps et dans l'espace (Svoboda et al. 2002).

Depuis 1994, prenant conscience des dégâts provoqués par les événements de sécheresse répétés dans l'État du Chihuahua au Mexique, les décideurs, les politiques, les scientifiques et les universitaires se sont concertés et leurs efforts ont abouti à la création du Centre de recherche sur la Sécheresse (Robles et al, 2006). Le but du centre NDMC (National drought mitigation center) développé aux Etats-Unis d'Amérique est de rassembler, mesurer, et cartographier les impacts de la sécheresse et fournir aux rapporteurs un accès aux résultats à travers des outils de recherche faciles et interactifs. Les utilisateurs peuvent soumettre leurs propres rapports des impacts de la sécheresse. Dans le même contexte, d'autres pays tels que le Canada, l'Italie, l'Espagne,..., ont développés des centres de mitigation et de planning semblables pour une meilleure compréhension et analyse du phénomène.

Récemment, le programme « MEDROPLAN » Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning a été développé par l'Europe Aid Co-operation Office avec la collaboration de scientifiques et d'acteurs de l'eau de Chypre, Espagne, Grèce, Italie, Maroc et Tunisie, comme initiative pour la préparation de directives de gestion et de mitigation des sécheresses dans les pays méditerranéens. Le guide permet de fournir une approche efficace et systématique pour mettre au point des plans de gestion de la sécheresse alliant science et politique.

Donc préparer un guide pratique de gestion de la sécheresse, en adaptant une méthodologie basée essentiellement sur l'expérience Algérienne, et celle des autres pays, tout en prenant en considération les connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques acquises dans ce domaine est nécessaire. Or, la sécheresse fait partie du climat (Jarraud, 2006), et les statistiques communément disponibles pour analyser les variables qui sont à l'origine des sécheresses, telles que, les précipitations ou les séries de débits, sont basées sur l'étude fréquentielle des étiages, l'étude des séries temporelles, la genèse de données synthétiques, la théorie des séquences, la régression multiple, etc. Cependant, on trouve dans la littérature toute une pléthore d'ouvrages sur le sujet. Si depuis des décennies, les lois statistiques classiques ont fait le bonheur des hydrologues statisticiens, aménageurs, concepteurs et autres, aujourd'hui, un constat amer se pose : toutes ces lois classiques, souvent utilisées abusivement, trouvent des limites dans l'étude des événements d'occurrence rare. Des études

récentes (Hubert et Bendjoudi, 1998) ont montré que la loi de Laplace-Gauss qui est la plus utilisée pour la modélisation statistique des pluies annuelles, mais aussi toutes les autres lois à décroissance exponentielle, ne permettent pas d'ajuster d'une façon satisfaisante les queues de distribution des séries longues. Donc, il est important de modéliser les précipitations maximales probables afin de les utiliser dans la prévision des crues extrêmes telle que dans la gestion des inondations.

2.5. Analyse fréquentielle des pluies

2.5.1. Rappel théorique sur le contrôle des données et l'analyse fréquentiel

2.5.1.1. Hypothèses de l'analyse statistique

Les calculs statistiques sont basés sur un certain nombre d'hypothèses qui doivent en principe être vérifiées. Parmi celles-ci, citons :

- **Les mesures reflètent les vraies valeurs** - Cette hypothèse n'est malheureusement jamais réalisée en pratique, du fait des erreurs systématiques ou aléatoires.
- **Les données sont consistantes** - Aucune modification dans les conditions internes du système n'intervient durant la période d'observation (position du pluviomètre, procédures d'observation, observateur unique).
- **La série de données est stationnaire** - Les propriétés de la loi statistique qui régit le phénomène (moyenne, variance ou moments d'ordre supérieur) sont invariantes au cours du temps.
- **Les données sont homogènes** - Une série de données est réputée non homogène lorsque :
 1. Elle provient de la mesure d'un phénomène dont les caractéristiques évoluent durant la période de mesure; le phénomène est alors dit non-stationnaire. Par exemple: variations climatiques, variations du régime des débits dues à une déforestation ou un reboisement. Il est également possible d'observer des signes d'une non stationnarité apparente lorsque l'électronique intégrée à l'équipement de mesure présente une dérive temporelle ou lors du changement de l'observateur.
 2. Elle reflète deux ou plusieurs phénomènes différents. Le régime d'une rivière à l'aval de la confluence de deux sous bassins dont le comportement hydrologique est très contrasté constitue un bon exemple de ce défaut d'homogénéité.

- **La série de données est aléatoire et simple** - Le caractère aléatoire et simple d'une série d'observations est une hypothèse fondamentale pour l'analyse statistique. Un échantillon aléatoire signifie que tous les individus de la population ont la même probabilité d'être prélevés. Un *échantillon simple* signifie que le prélèvement d'un individu n'influe pas la probabilité d'apparition des individus suivants. Autrement dit, si toutes les observations de la série sont issues de la même population et qu'elles sont indépendantes entre elles, la série est alors aléatoire et simple. La non vérification du caractère aléatoire et simple peut avoir plusieurs causes, parfois simultanément. Ces causes se groupent en deux catégories, les défauts d'auto corrélation d'une part (caractère non aléatoire des séries) et les défauts de stationnarité du processus d'autre part (dérive à long terme et dérive cyclique).
- **La série doit être suffisamment longue** – La longueur de la série influe sur les erreurs d'échantillonnage, notamment sur le calcul des moments d'ordre supérieurs donc sur les tests inhérents à leur fiabilité.

2.5.1.2. Les grandes catégories des tests statistiques

On peut classer les tests soit selon leur objet (but) ou selon leurs propriétés mathématiques.

➤ Tests selon leurs propriétés mathématiques

Un test est dit paramétrique si son objet est de tester certaines hypothèses relatives à un ou plusieurs paramètres d'une variable aléatoire de loi spécifiée. Dans la plupart des cas, ces tests sont basés sur la considération de la loi normale et supposent donc explicitement l'existence d'une variable aléatoire de référence X suivant une loi normale. La question se pose alors de savoir si les résultats restent encore valables lorsque X n'est pas normale: si les résultats sont valables on dit que le test en question est robuste. La robustesse d'un test par rapport à un certain modèle est donc la qualité de rester relativement insensible à certaines modifications du modèle. Un test est dit non paramétrique s'il ne fait pas appel à des paramètres ou d'hypothèses précises concernant la distribution sous-jacente.

➤ Tests selon leur objet

Les tests statistiques généralement les plus utilisés en hydrologie.

➤ Tests de conformité

Les tests de conformité comparent la moyenne ou la variance d'un échantillon à la moyenne ou la variance de la loi théorique de la population dont il est issu. Deux tests sont utilisés pour

la conformité de la moyenne selon que la variance est connue ou doit être estimée, il s'agit respectivement de test z et de Student, appelé aussi test t. Pour ces tests statistiques de base, le lecteur se référera à un ouvrage de statistiques (Morgenthaler, 1997).

➤ Tests d'homogénéité

Le test d'homogénéité de la moyenne se base sur la statistique de Student pour deux échantillons tandis que le test d'homogénéité de la variance correspond au test de Fisher-Snedecor. Dans ce cas également le lecteur se référera à un ouvrage classique de statistique (Meylan et Musy, 1998).

2.5.2. Définition de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. L'analyse fréquentielle fait appel à diverses techniques statistiques et constitue une filière complexe qu'il convient de traiter avec beaucoup de rigueur. Ses diverses étapes peuvent être schématisées très simplement selon le diagramme suivant (Figure 2.1) : La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Diverses lois peuvent contribuer à faciliter ce choix, mais il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible. Le choix d'un type de modèle probabiliste est souvent basé sur des habitudes locales, qui, à la longue, deviennent de véritables coutumes. Un tel choix résulte fréquemment de l'expérience d'un ou de plusieurs auteurs, constituant peu à peu des écoles. L'attitude du praticien, suivant telle ou telle école, est légitime dès lors qu'elle le fait bénéficier d'une grande somme d'expérience, mais elle a aussi ses dangers. En effet elle peut conduire à perpétuer un choix, parfois mal fondé, dans des situations, où il peut se révéler inadéquat. Dans certains pays, ou dans certaines administrations, il existe en effet des règles ou normes qui fixent la méthodologie d'une analyse fréquentielle. Pour l'étude des débits maximums, par exemple, la loi log-Pearson III est recommandée aux Etats-Unis.

➤ Loi normale

La loi normale se justifie, théoriquement par le théorème central-limite, comme la loi d'une variable aléatoire formée de la somme d'un grand nombre de variables aléatoires. En

hydrologie fréquentielle des valeurs extrêmes, les distributions ne sont cependant pas symétriques, ce qui constitue un obstacle à son utilisation. Cette loi s'applique toutefois généralement bien à l'étude des modules annuels des variables hydrométéorologiques en climat tempéré.

➤ Loi log-normale

La loi log-normale est préconisée par certains hydrologues dont V.-T. Chow qui la justifie en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. Dès lors la variable aléatoire $X = X_1.X_2....X_r$ suit une loi log-normale. En effet le produit de r variables se ramène à la somme de r logarithmes de celles-ci et le théorème central-limite permet d'affirmer la log-normalité de la variable aléatoire

➤ Loi de Gumbel

E. J. Gumbel postule que la loi double exponentielle, ou loi de Gumbel, est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, cette loi doit ainsi être capable de décrire les séries de maxima annuels.

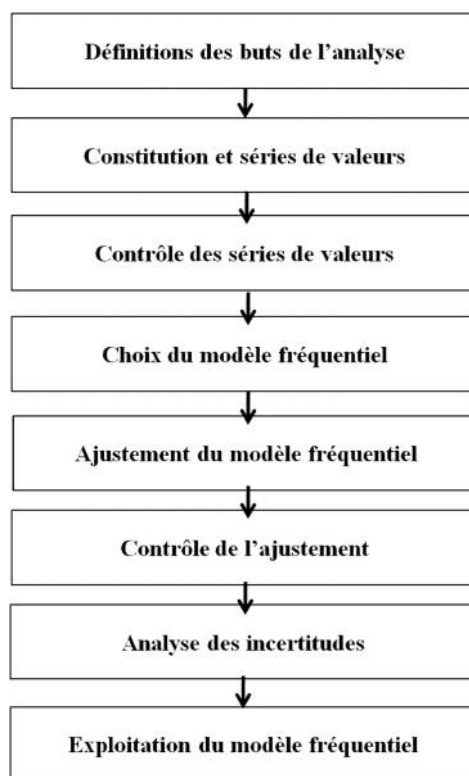


Figure 2.1 : Principales étapes de l'analyse fréquentielle.

(Meylan et Musy, EPFL, 1999)

Il est à remarquer que plus le nombre de paramètres d'une loi est grand, plus l'incertitude dans l'estimation est importante. Pratiquement il est par conséquent préférable d'éviter l'utilisation de lois à trois paramètres ou plus. Le lecteur se référera à l'ouvrage de Meylan et Musy (1998) pour plus de détails. Cette synthèse bibliographique montre l'importance du phénomène étudié et combien la communauté scientifique s'intéresse au changement de la variabilité climatique, 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.

Chapitre 3

Présentation, Collecte des données de base et étude de la régionalisation de la Zone d'étude

3.1. Introduction

La connaissance des conditions climatiques d'une région nécessite de longues séries pluviométriques, sur plusieurs stations d'un bassin versant, car elle permet de mieux percevoir l'évolution du régime pluviométrique sur la région. Elle permet aussi de maîtriser les apports non contrôlés qui engendrent le bon fonctionnement du système de prévision et de gestion des ressources hydriques à court, moyen et long terme.

3.2. Présentation de la zone d'étude

3.2.1. Présentation géographique

Le bassin versant de Medjerda qui s'étale entre l'Algérie et la Tunisie occupe une superficie de 23700 km² dont 7600 km² en territoire algérien. Ce dernier est bordé au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'Ouest par les bassins de la Seybouse et des hauts plateaux Constantinois, au Sud par le bassin de Chott Melghrir, et à l'Est par la Tunisie. Ce bassin est aussi traversé par un des principaux oueds maghrébins, la Medjerda au Nord et le Mellègue au Sud (Figure 3.1).

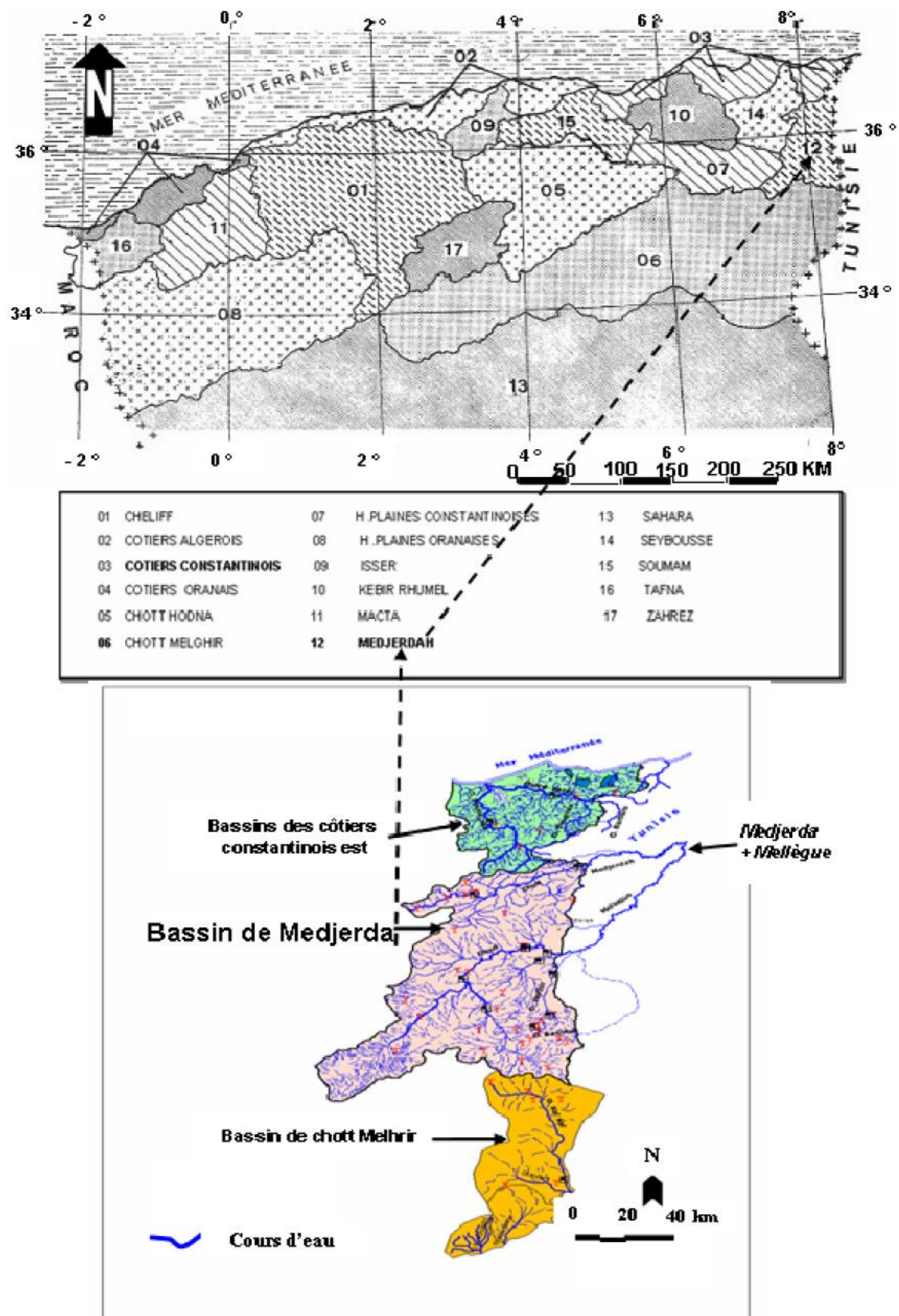


Figure 3.1 : Situation du bassin versant de Medjerda Nord-est Algérie.

(Source : ANRH 2008)

3.2.2. Géologie

Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir: L'Atlas Tellien au Nord et saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de montagnes dont l'altitude varie entre 1400 m et 700 m. Il se caractérise par une végétation très développée et dense. Au Sud, il est considéré comme le prolongement naturel des hautes plaines constantinoises sans pour autant en avoir les mêmes caractéristiques naturelles et physiques. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-ouest, Nord-est. Cette structure est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du crétacé. Leur couverture est généralement mince.

Selon David (1956) la zone est caractérisée par deux périodes orogéniques, une période pré-orogénique caractérisée par un calme parfait, l'autre orogénique très courte et mouvementée ou de nombreuses phases orogéniques se succèdent depuis le Crétacé jusqu'au Quaternaire.

La première période pré-orogénique débute à l'aube du crétacé où se sont produits les premiers plissements qu'a connus la zone. Ces plissements sont survenus vers la fin du Maestrichtien au cours desquels il y a eu l'émersion des hautes plaines, puis vers la fin du l'Eocène le calme revient. La deuxième période au cours de laquelle se sont produites plusieurs phases de diastrophisme, débutant à l'Eocène. Vers la fin du Luthérien et se prolonge jusqu'au quaternaire. Au commencement, elles étaient faibles puis paroxysmales puis faibles de nouveau. La phase préliminaire qui avait mis fin à la longue période de sédimentation (depuis le crétacé) était post-Lutétien et anti-Bartonien. Elle était responsable du premier véritable plissement. La première phase majeure post-Oligocène et Anté-Miocène avait mis fin au dépôt Oligocène à faciès Numidien. Pendant cette phase, les poussées venues du Nord-Ouest étaient très intenses. Elles étaient responsables de la modification de la structure de la zone Nord par la mise en place de la chaîne montagneuse Nord à structure fortement plissée. La zone sud avait déjà sa constitution définitive et la structure plissée était en place. La deuxième phase majeure était post-Miocène inférieur et Anté-Miocène supérieur pendant laquelle la chaîne tellienne maximum où il y avait des plis-faillés et des écaillés jusqu'à de véritables nappes de charriage. L'oued Medjerda s'étire Sud-Ouest–Nord- Est, le long du versant méridional des monts arrosés de Medjerda. Ayant pris sa source à la limite du front

des nappes telliennes (dominance de sédiments marno-gréseux du Miocène), il franchit le diapir salifère (Trias) de Souk Ahras.

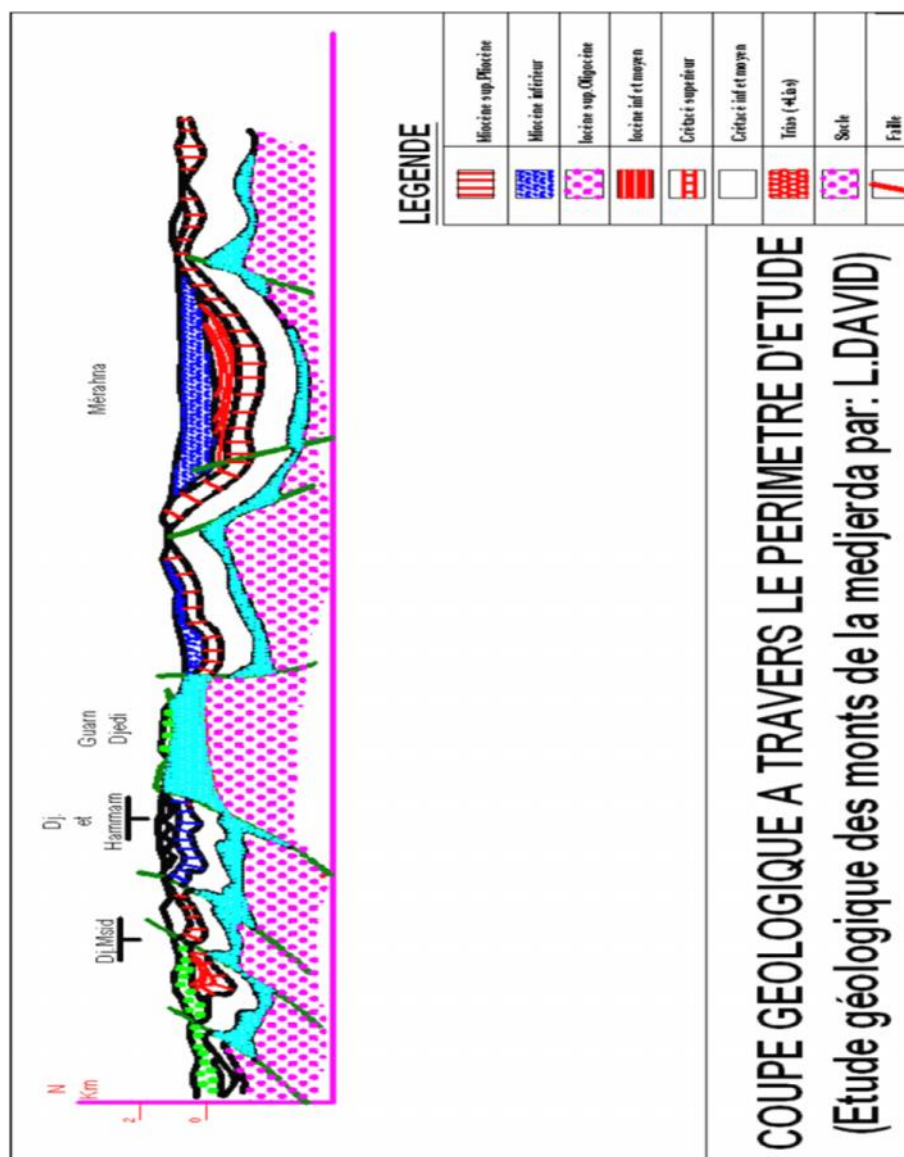


Figure 3.2 : Coupe géologique du bassin versant de Medjerda Nord-est Algérie.

(Source : L.David, 1956)

Le cours d'eau descend une série de petits biefs étagés et suit alors le contact des grès oligocènes avec les calcaires puis les alternances marneuses et marno-calcaires crétacées du vaste dôme anticlinal éventré de Berdah; il débouche dans la plaine de Ghardimaou en Tunisie (Figure 3.3). Sur la haute vallée de Medjerda est implanté le barrage d'Ain Dalia, au Sud-Ouest de la ville de Souk Ahras. L'oued Mellegue, d'orientation Sud-Nord puis Est-

Ouest, possède un bassin beaucoup plus vaste, à dominance semi-aride. Il est formé dans sa partie supérieure par deux branches, l'oued Meskiana qui naît dans les Hautes Plaines (issu d'un exutoire du chott Esbikha, perché à 1 065 m d'altitude) bordant le piémont septentrional de Nememcha, et l'oued Chabro, dans le flanc Nord des monts de Tebessa.

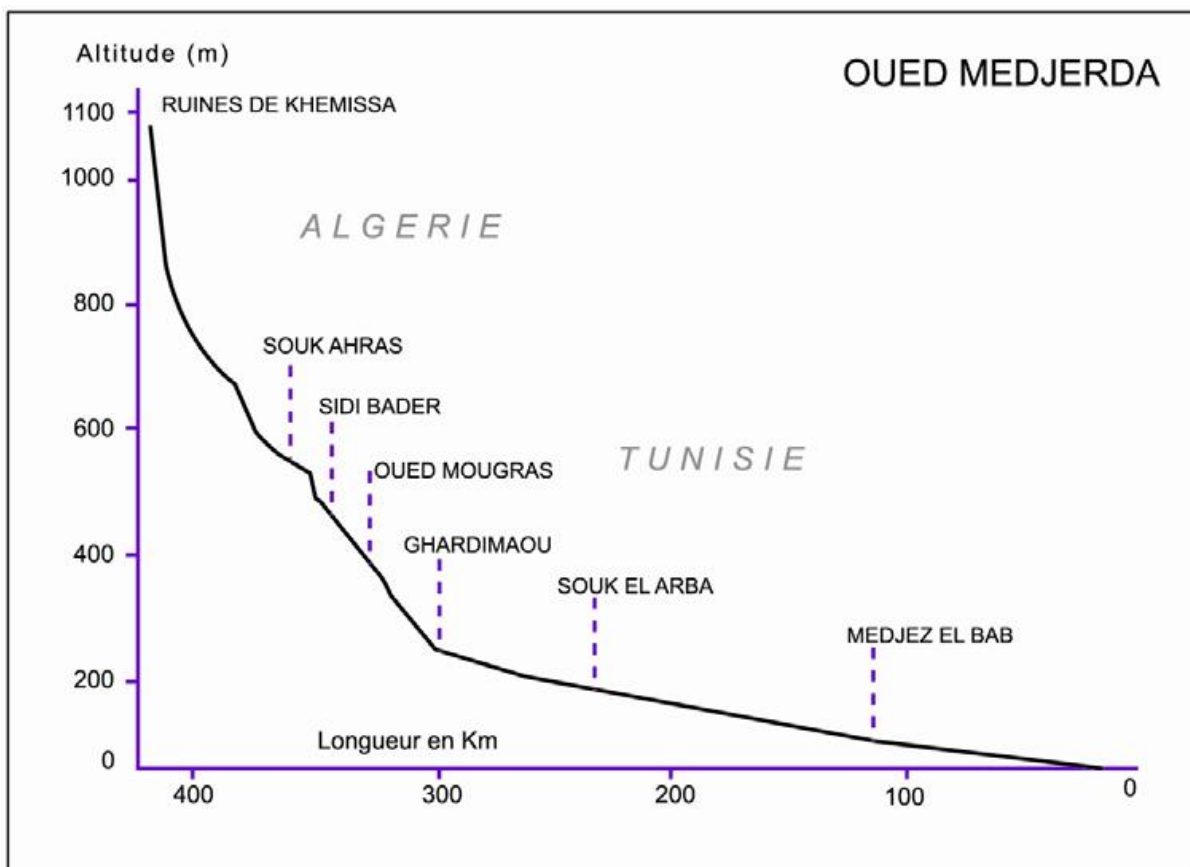


Figure 3.3 : Profil en long de l'oued Medjerda (d'après Gautier E-F., 1910)

L'oued Mellegue s'enfonce d'Ain Dahlaa jusqu' à Meskiana, au coeur d'un ample dôme crétacé supérieur. A partir de là, le parcours de l'oued est influencé par la complexité des structures géologiques qu'apporte la présence des diapirs triasiques (Mesloul, Ouenza) et des fossés subsidants transversaux (Morsotte, oued Bou Rhanem) (Rodier J-A. et al., 1980).

3.2.3. Climat

Le climat de la Medjerda se caractérise par un climat continental à influence méditerranéenne et désertique avec une pluviométrie variant entre 300 et 950 mm/an (Figure 3.4). Le maximum des jours de fortes pluies hivernales et du vent violent rencontré en décembre,

janvier, est provoqué par le passage successif des dépressions d'Ouest, de quelques dépressions méditerranéennes.

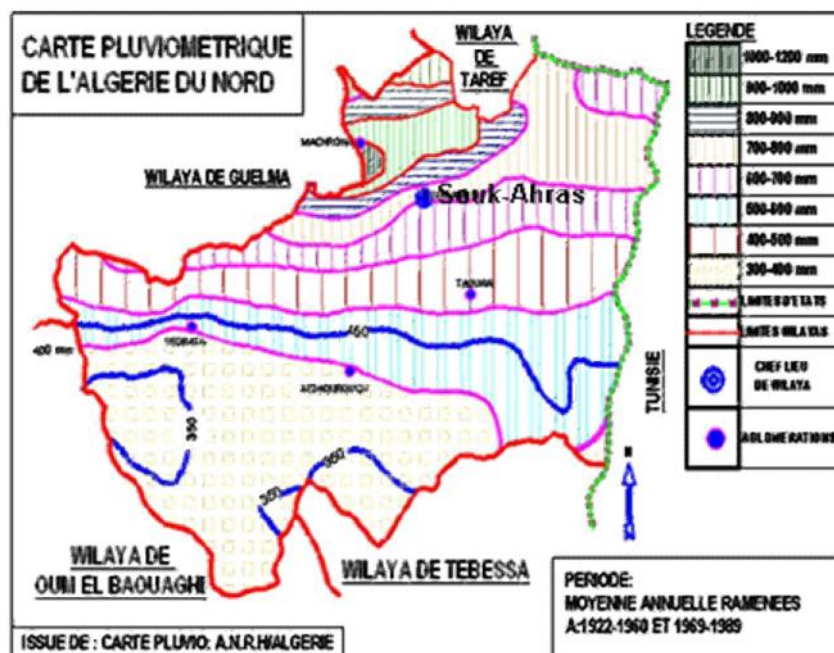


Figure 3.4 : Isohyètes moyennes annuelles au niveau d'oued Medjerda (Souk-Ahras au Nord et Tébessa au Sud) (Source : A.N.R.H 1993).

Les mois de Juillet et d'Août ont aussi des précipitations moyennes inférieures au module qui est de 45,7 mm. La majorité des pluies de ces mois secs est occasionnée essentiellement par des orages violents et parfois par le passage de fronts froids associés à des vents du Nord. De grandes quantités d'eau peuvent tomber en un seul mois. L'extrême variabilité des précipitations mensuelles d'une année à l'autre, est une autre caractéristique du régime pluviométrique de la région de l'oued Medjerda. Si l'écart type reste relativement constant d'un mois à l'autre; le coefficient de variation connaît des fluctuations importantes, surtout pour les mois inférieurs au module. Cet aspect rend difficile la gestion des ressources en eau de ces mois secs, et des mois qui les suivent (Figure 3.5). Par ailleurs, la corrélation entre les précipitations mensuelles de chaque mois est très faible (Tableau 3.1) et caractérise l'indépendance de deux mois successifs. Par conséquent, la prévision des précipitations futures au cours de l'année d'après les précipitations mensuelles passées est plus qu'incertaine. Les faibles corrélations entre les précipitations mensuelles de chaque mois peuvent s'expliquer par l'extrême diversité des types de temps qui se succèdent à Souk-Ahras région d'oued Medjerda.

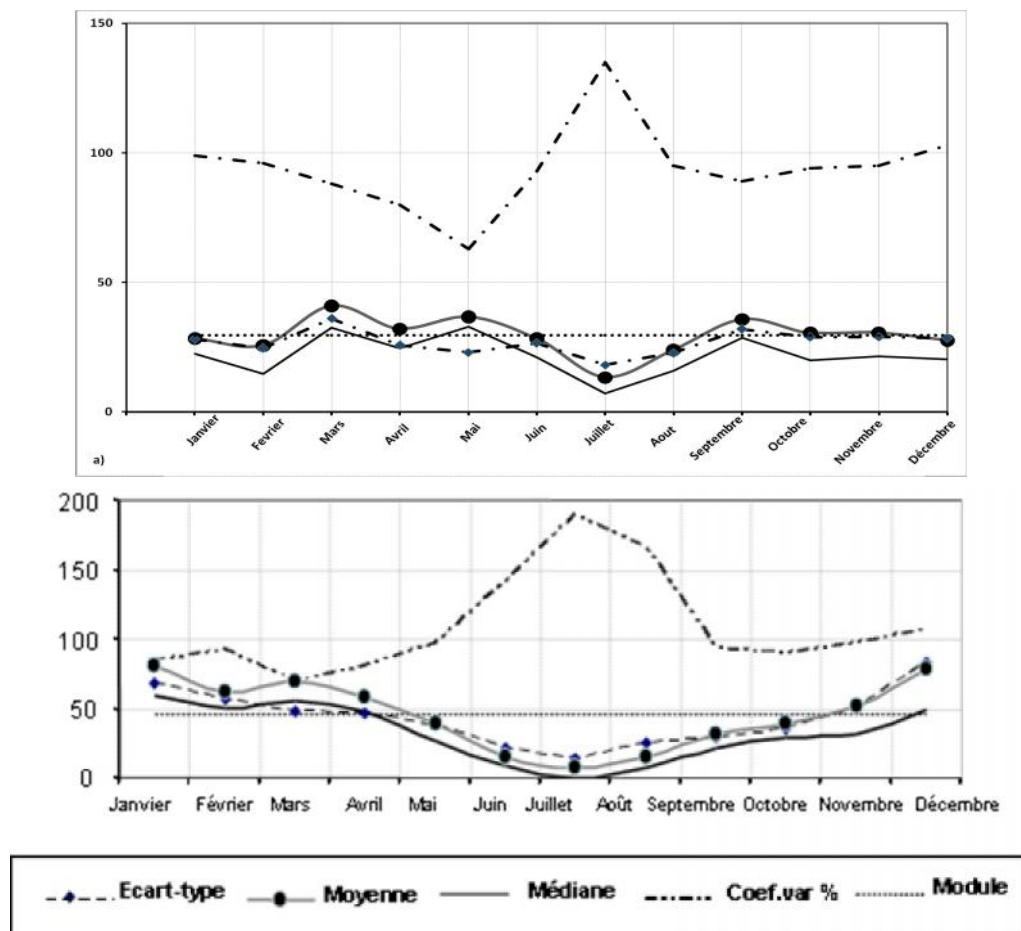


Figure 3.5 : Précipitations moyennes mensuelles (mm), écart type, coefficient de variation %, médiane et module de a)Tébessa, b) Souk-Ahras.

Tableau 3.1 : Corrélation entre les précipitations mensuelles de chaque mois												
	Janv.	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Janvier	1.00											
Février	0.30	1.00										
Mars	0.05	0.22	1.00									
Avril	0.04	0.34	-0.04	1.00								
Mai	-0.18	-0.27	-0.10	0.25	1.00							
Juin	-0.15	-0.18	-0.21	-0.05	0.44	1.00						
Juillet	-0.15	0.02	0.03	-0.08	-0.07	0.04	1.00					
Août	-0.28	-0.20	-0.29	-0.02	-0.13	0.01	0.57	1.00				
Septembre	-0.26	0.01	0.05	-0.08	0.09	0.12	0.48	0.33	1.00			
Octobre	-0.05	0.12	0.16	0.35	0.11	-0.24	-0.07	0.06	0.12	1.00		
Novembre	-0.04	-0.10	0.15	-0.13	0.05	0.02	0.02	-0.05	0.32	0.00	1.00	
Décembre	0.17	-0.03	0.13	-0.05	0.12	0.23	-0.19	-0.31	0.04	0.19	0.20	1.00

Ces situations météorologiques variées écartent la possibilité d'individualiser des saisons. On peut uniquement parler de la succession de phases humides et de phases sèches. L'étude des températures moyennes mensuelles pourrait apporter des renseignements susceptibles de définir plus précisément le régime climatique de la région. Le régime climatique de l'oued Medjerda est de type méditerranéen dégradé. Cette première approche du climat de cette station, a révélé l'extrême variabilité des précipitations moyennes mensuelles. Cette caractéristique risque d'avoir des répercussions sur l'évolution climatique d'ensemble et sur la distribution des précipitations de la région.

3.3. Présentation des données

3.3.1. Description de la base de données

La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (Seltzer, 1913-1938 ; Gaussen, 1918-1947 ; Medinger, 1913-1953 ; Chaumont et Paquin, 1913-1963). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part, bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien, et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente.

Les données pluviométriques proviennent des deux établissements responsables du réseau pluviométrique en Algérie, à savoir l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Office Nationale de Météorologie (ONM). Dans ces séries de données climatiques ; il a été tenté d'identifier un maximum de postes de mesures répondant aux conditions suivantes:

1. la taille de l'échantillon (information couvrant les quatre dernières décennies);
2. la position géographique;
3. la qualité des données (pas de lacunes de plus de trois années consécutives).

Seize stations ont été retenues dans cette étude dont les longueurs des enregistrements varient entre 19 et 38 ans (Tableau.3.2). Les années présentant des mois lacunaires ont été comblées si le déficit n'a pas été trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépasse pas 3, et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux. Pour les pluies journalières, trois stations Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza dont les chroniques sont disponibles et couvrent

la période 1969-2007. Nous avons également utilisé des séries climatiques (température et pluie) les plus longues et disponibles sur la zone d'étude; station de Souk-Ahras et Tébessa a une période de 25 ans (1913-1938) série de Seltzer (1946).

Tableau 3. 2: Liste des stations pluviométriques retenues pour l'étude.

No	Code	Stations	Période d'observation	Latitude X (km)	Longitude Y (km)	Altitude Z (m)
1	120103	AinSenour	1969-2000	964,05	348,20	830
2	120101	Souk-Ahras	1969-2007	967,25	342,25	590
3	120115	AinDalia	1988-2007	963,95	341,65	717
4	120104	Khemissa	1971-2007	945,50	332,50	900
5	120403	M'Daourouche	1969-2000	960,85	320,65	870
6	120401	Ouenza	1969-2007	989,00	313,00	520
7	120402	ElAouinette	1971-2007	967,80	297,40	650
8	120405	Messloulou	1970-2007	963,60	298,20	700
9	120302	Boukhadra	1969-2007	982,25	285,95	900
10	120317	OuledHamza	1969-2007	988,90	265,00	840
11	120301	Tébessa	1969-2007	991,90	247,20	890
12	120307	Bekaria	1971-2007	1002,35	244,55	895
13	120501	RasElaouine	1971-2007	1006,50	261,20	995
14	120201	Messkianna	1969-2007	949,70	271,00	845
15	120202	AinDahla	1969-2007	940,85	250,40	980
16	120504	Elkouiff	1969-2007	1009,70	259,15	1100

En ce qui concerne les températures de l'air à ces mêmes stations, elles couvrent respectivement les périodes (1978-2007) et (1969- 2007). Les périodes des données de température sont liées à la disponibilité de ces données au niveau du service de météorologie nationale. Ces données sont assez homogènes, de bonne qualité et représentatives du bassin d'étude qui se situe entre 35° 11' et 36° 27' de latitude Nord et entre 7°11' et 8° 24' de longitude Est (Figure 3.6).



Figure 3.6 : Stations pluviométriques retenues pour l'étude du bassin de la Medjerda.

3.3.2. Description du réseau hydrographique du bassin de Medjerda

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau et les affluents permanents ou temporaires, par lesquelles s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant. D'après la carte du réseau hydrographique (Figure 3.7), on constate que la confluence d'Oued Medjerda (Souk-Ahras) et Oued Mellegue donne la naissance d'Oued Medjerda (Cour d'eau principale). Oued Mellegue résulte par la jonction des deux Oueds: le 1er Oued Mellegue Amont qui à une direction SO-NE, le 2^{ème} Oued Mellegue Aval c'est le résultat de la confluence de Oued Ksob, Oued Zerga. Par ailleurs, la jonction d'Oued Meskiana et aussi Oued Chabro donne la naissance d'Oued Mellegue Amont. L'oued Medjerda prend sa source à 20 km de Souk-Ahras et occupe une superficie de 1430 km². Il s'écoule vers l'Est avant de se jeter dans la mer Méditerranée au niveau du golf de Tunis. Ain Dalia est le barrage le plus important en alimentation en eau potable coté algérien et se classe deuxième après celui de Seliana en Tunisie. La cuvette d'Ain Dalia a une superficie de 193 Km², une capacité de 82 millions de m³, et un volume régularisable de 40

millions m³. Elle représente la principale source d'alimentation en eau potable pour la région de Souk-Ahras ainsi que pour d'autres régions limitrophes (Tébessa, Oum El Baouqui, Bouchegouf, et El-Aouinette).



Figure 3.7: réseau hydrographique du bassin de la Medjerda et stations hydrométriques retenues pour l'étude.

3.3.3. Présentation des rivières

L'approche proposée a été appliquée sur 5 rivières algériennes:

- 1) Oued Medjerda.
- 2) Oued Mellègue.
- 3) Oued El-Ksob.
- 4) Oued Zerga.
- 5) Oued Chabro.

Le choix des stations utilisées s'est basé sur deux critères:

- Longueur de la période d'étude.
- Représentativité des données.

Pour les données hydrométriques proviennent aussi de l'ANRH et couvrent une partie restreinte de la zone d'étude. La liste des stations hydrométriques retenues, ainsi que leurs spécificités sont représentées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Stations hydrométriques retenues dans l'étude						
Station	Coordonnées Lambert			S (km²)	Période	Bassin
	X (km)	Y (km)	Altitude(m)			
Souk-Ahras	967.7	342.2	580	217	1968-1987	Medjerda
AinDalia	963.95	341.75	717	193	1988-2007	
Ain-Zerga	995.67	274.98	840	49	1973-2003	Zerga
El-Aouinette	968	298.25	630	3535	1973-1984	Mellègue Amont
Ouenza	989.60	312.75	480	4575	1969-2007	
El Azreg	996	306.20	470	544.8	1984-2003	El-Ksob Mellègue Aval
Morsette	976	277.50	700	1305	1973-2001	
						Chabro

3.4. Etude d'homogénéité des séries

La question de l'homogénéité, ou du non homogénéité des observations est un problème important, compte tenu, des conséquences que peut entraîner l'utilisation de séries non homogènes, considérées en fait comme homogènes. Une série est dite homogène, si les observations qui la composent ont été observées de la même façon et sont issues de la même population. Pour les statisticiens, la série de données est dite homogène, si les propriétés

statistiques de l'erreur de mesure affectant ces données sont restées invariables au cours de la période d'observation.

D'une façon générale, les éléments climatiques dans le temps ne se produisent pas de la même façon et la série correspondante n'est pas purement stationnaire.

Les causes perturbatrices les plus courantes de l'homogénéité des observations sont :

1. Le mauvais état ou la défectuosité d'appareils de mesures ;
2. Un changement d'observateur ;
3. Le déplacement de la station (différences topographiques) ;
4. Le changement de type d'appareils, de leurs conditions d'installations (hauteur au-dessus du sol) ;
5. à la lecture non adéquate du pluviomètre qui entraîne une forte hétérogénéité des séries pluviométriques (Cantat., 2004).

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

L'examen visuel des totaux annuels de toutes les stations pour la période d'étude 1969-2007 de notre zone, montre que quelques séries sont affectées par un manque d'homogénéité ou par des lacunes. Les méthodes citées ci-dessous ont été utilisées pour le comblement de lacunes et l'étude de l'homogénéité.

3.4. 1. Estimation des données manquantes

On peut estimer les données manquantes ou erronées à une station à partir des valeurs provenant des stations voisines soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone géographique. Des méthodes sont proposées pour la restitution des données pluviométriques :

- Remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche ;
- Remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines.

Cette méthode est utilisée lorsque les précipitations moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10% des précipitations moyennes annuelles aux stations de référence.

Pour notre étude la qualité des données pluviométriques utilisées (pas de lacunes de plus de trois années consécutives). Les années présentant des mois lacunaires ont été comblées si le déficit n'a pas été trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépasse pas 3 et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux.

3.4. 2. La méthode du double cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter : une fois que les valeurs sont cumulées, la droite des cumuls est plus obtenue en fonction de la station à tester et d'une deuxième station de la même région, qu'on appellera station de référence, cette dernière devra être homogène dès le départ.

La similitude de comportement des deux stations se traduit par un quasi alignement des points représentatifs ; Une déviation de comportement d'une des deux séries (stations) va se traduire par un nouvel alignement le long d'une droite différente de la première. Cette méthode est particulièrement utilisée pour tester l'homogénéité et détecter l'époque de la tendance de quelques stations de la région d'étude.

Les stations de Souk-Ahras, d'Ouenza, et Tébessa sont considérées comme des stations homogènes, car les techniciens de l'ANRH confirment l'homogénéité de ces stations.

Nous avons pris cinq stations de référence pour la méthode (double cumul) :

1. Station de Souk-Ahras pour tester l'homogénéité des stations voisines (AinSenour, khemissa, AinDalia) (Figure 3.8).
2. Station d'Ouenza pour tester l'homogénéité des stations voisines (Messloul, M'Daourouche, ElAouinette) (Figure 3.9).
3. Station de Tébessa pour tester l'homogénéité des stations voisines (Ouled hamza, Boukhadra, Bekaria)) (Figure 3.10).
4. Station de RasElaouine pour tester l'homogénéité de la station voisine Elkouif) (Figure 3.11).

5. Station de Messkiana pour tester l'homogénéité de station voisine AinDahla) (Figure 3.12).

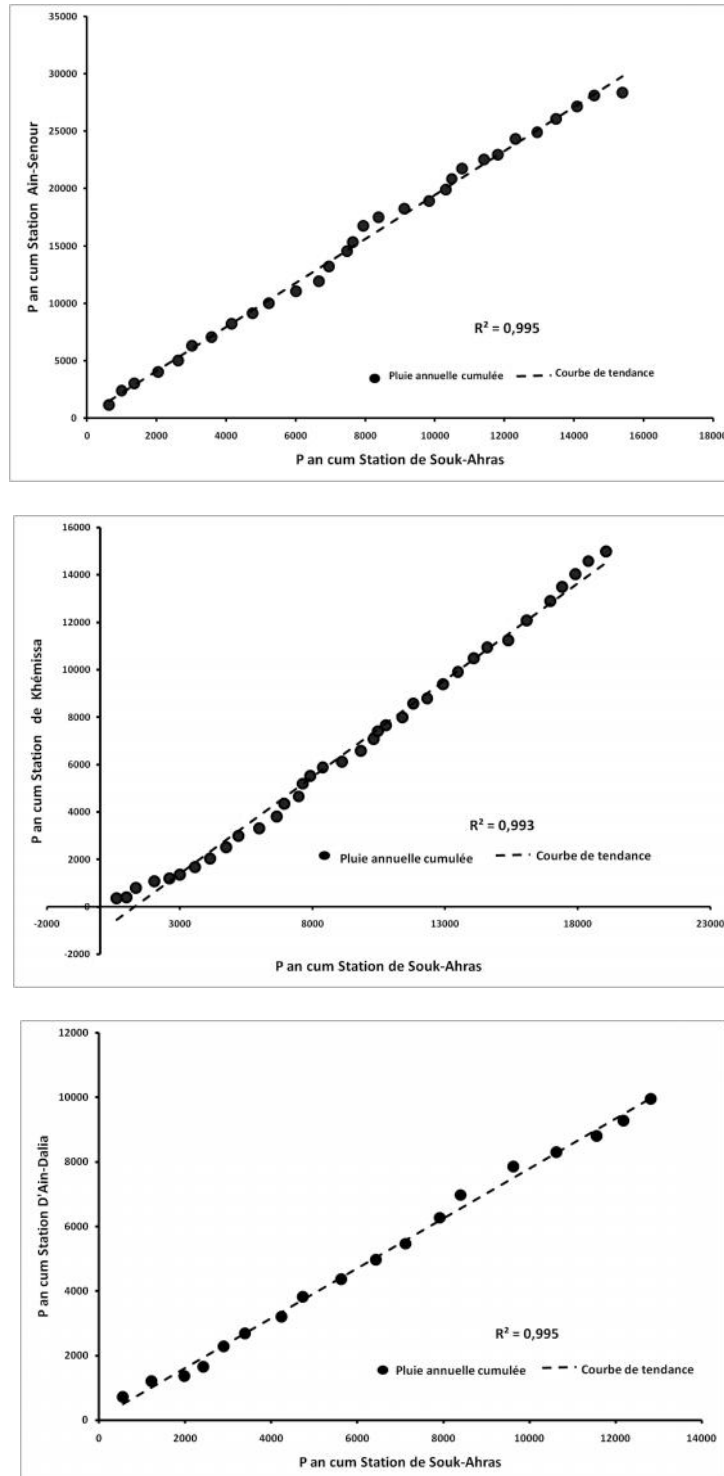


Figure 3.8 : Test d'homogénéité des stations de la région de Souk-Ahras.

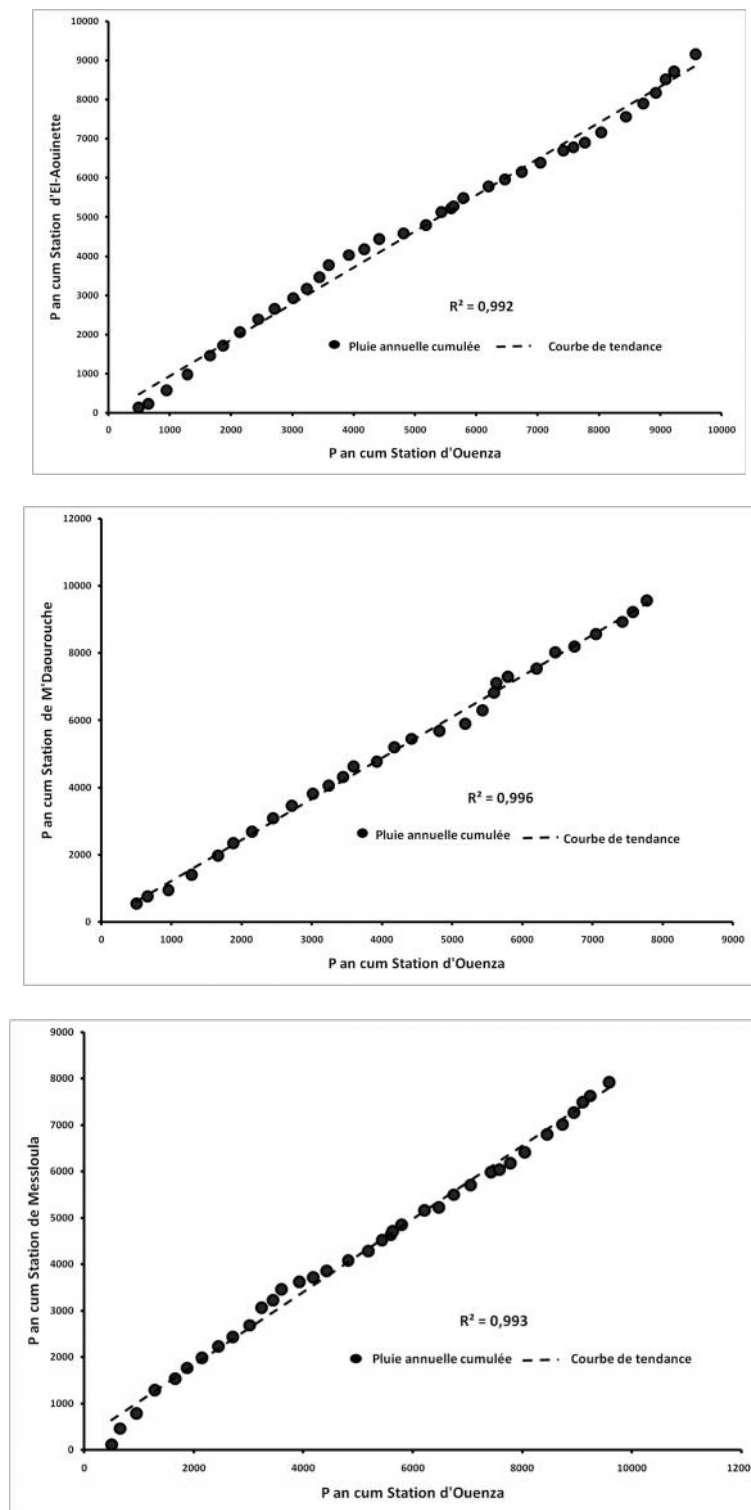


Figure 3.9 : Test d'homogénéité des stations de la région d'Ouenza.

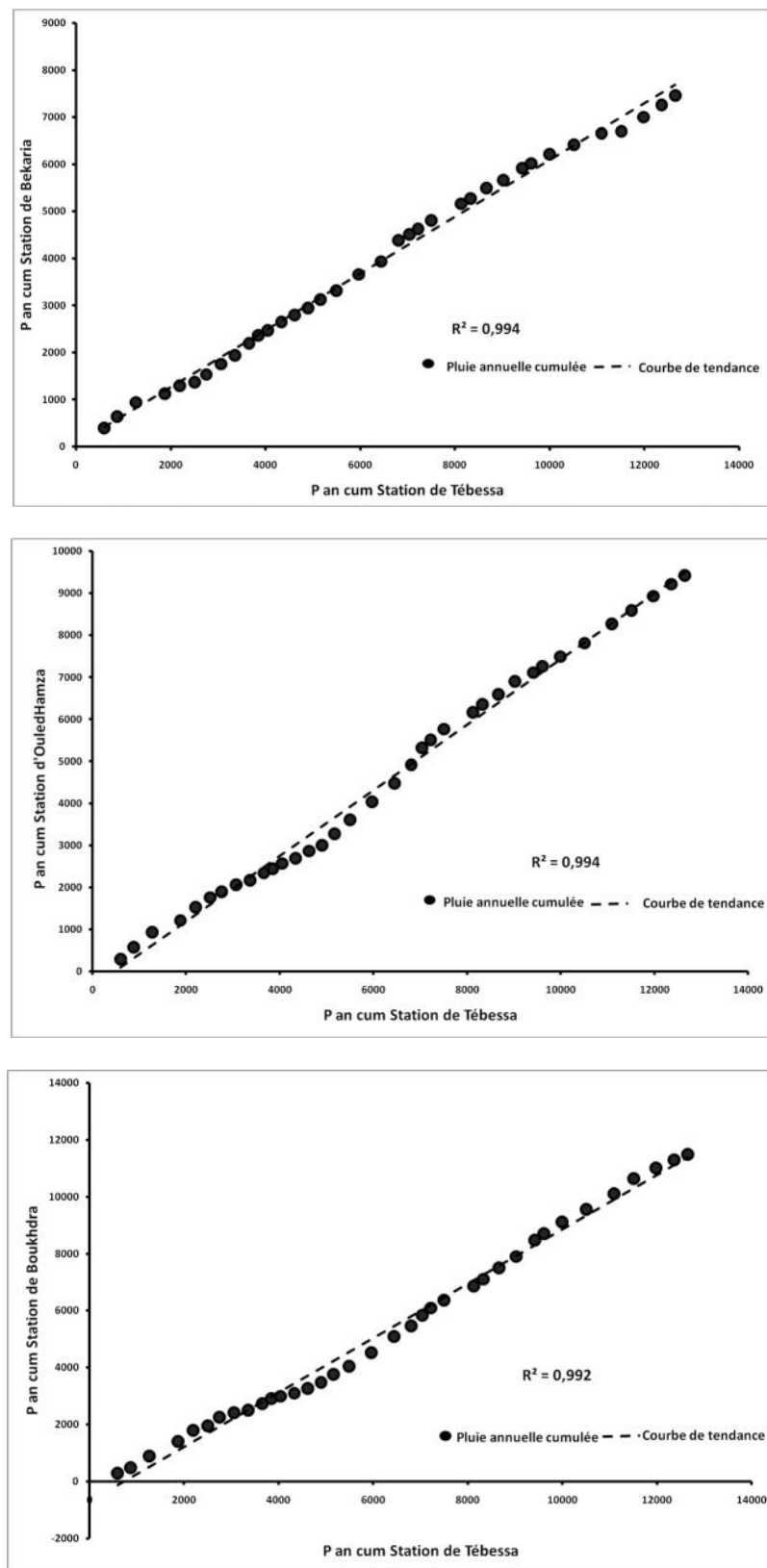


Figure 3.10 : Test d'homogénéité des stations de la région de Tébessa.

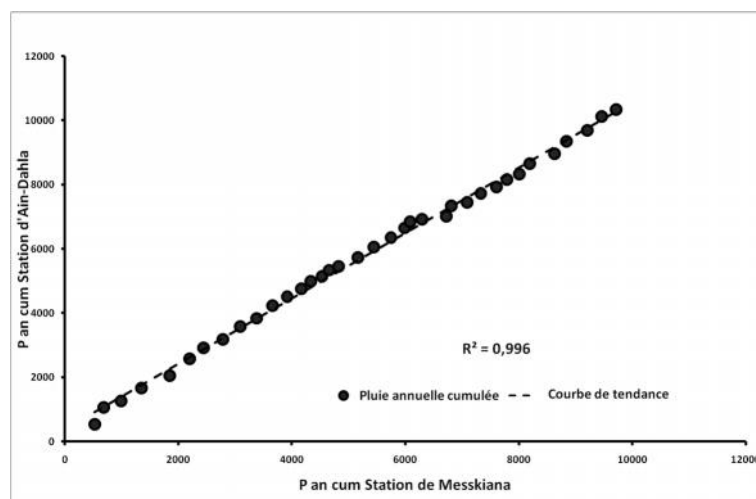


Figure 3.11 : Test d'homogénéité des stations de la région de Messkiana.

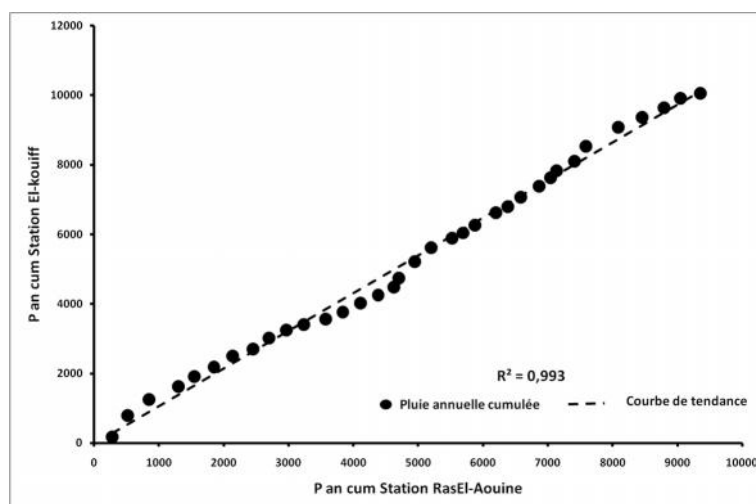


Figure 3.12 : Test d'homogénéité des stations de la région d'Ain-Dahla.

Les figures 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 montrent qu'il n'y a aucun changement de l'exploitation des stations de la zone d'étude. En termes de fiabilité de données pluviométriques, la plupart des stations pluviométriques ont présenté une bonne crédibilité. Nous remarquons d'après les coefficients de détermination, une bonne corrélation entre les séries pluviométriques. Donc on peut dire que ces séries sont homogènes.

3.5. Etude de la régionalisation par l'analyse en composante principale

L'A.C.P. est une bonne méthode pour étudier les données multidimensionnelles lorsque toutes les variables observées sont du type numérique, de préférence dans les mêmes unités, et que l'on veut voir s'il y a des liens entre les variables.

Le traitement statistique multivarié est le plus approprié pour extraire l'essentiel de l'information contenu dans un tableau de données. L'analyse simultanée de plusieurs variables peut se résoudre par un traitement graphique matriciel. Un traitement statistique de type factoriel, A.C.P. ou A.F.C., est également possible (Sanders, 1990).

L'analyse en composantes principales (ACP) est l'ensemble de méthodes permettant d'étudier les données en tenant compte de leurs caractères multidimensionnels. C'est une méthode particulièrement puissante qui consiste à trouver un nouvel espace où sont représentées les variables en perdant le minimum d'informations (Duby et Robin, 2006). Elle est fondée sur l'étude de la covariance ou de la corrélation entre variables. Dans la littérature, on trouve deux approches différentes de l'ACP :

- Elle peut être présentée comme la recherche d'un ensemble réduit de variables non-corrélées, combinaisons linéaires des variables initiales résumant avec précision les données.
- Une autre interprétation repose sur la représentation des données initiales à l'aide de nuage de points dans un espace géométrique. L'objectif est alors de trouver des sous-espaces (droite, plan,...) qui représentent au mieux le nuage initial.

Soient p variables aléatoires X_i qui ont été observées n fois :

$$X = \{X_{ij} ; i \in I ; j \in J\} \quad (4.1)$$

L'analyse du tableau X fait surgir des effets dus aux moyennes. Pour réduire les effets d'hétérogénéité des variables par rapport à leurs moyennes et leurs dispersions, on considère des variables centrées réduites de manière à ce qu'elles soient toutes de moyenne nulle ($\overline{X_j} = 0$) et de variance unité ($\sigma_j = 1$). Le tableau X devient alors :

$$X = \left\{ X_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X_j}}{\sigma_j \sqrt{n}} ; i \in I ; j \in J \right\} \quad (4.2)$$

Dans ce cas, la matrice à diagonaliser $X'X$ est la matrice des coefficients de corrélation linéaire des variables :

$$X'X = \left\{ \pm_{jk} ; \pm_{jk} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_{ij} - \overline{X_j})(X_{ik} - \overline{X_k})}{\pm_j \pm_k n} ; j \in J ; k \in J \right\} \quad (4.3)$$

On considère maintenant N comme le nuage de points formé par l'ensemble des individus, dans l'espace à p dimensions des variables. Le but de l'ACP est d'obtenir la représentation la plus fidèle possible du nuage N en le projetant sur un espace de faible dimension. Pour cela, on cherche à minimiser les " écarts " entre les points de N et leurs projections. Les espaces de représentation choisis sont des espaces affines (droite, plan,...). Le nuage N est alors exactement dans le sous-espace vectoriel engendré par les r premiers axes factoriels. Pour pouvoir obtenir les différentes représentations, il suffit de déterminer les coordonnées de la projection de tous les points du nuage sur chaque axe factoriel. Soit $C_1^i, \dots, C_n^i$ ces n coordonnées pour l'axe i . La i ème composante principale est donnée par le vecteur :

$$C^i = \begin{pmatrix} C_1^i \\ \dots \\ C_n^i \end{pmatrix}.$$

La qualité de la représentation est identifiée par un coefficient qui explique la position d'un paramètre dans le nuage du plan factoriel sélectionné. Il est donné par la somme des carrés des coefficients de la corrélation entre chaque paramètres et l'axe du plan factoriel (Dutot et al., 1983):

$$QLT(j) = \sum_{i=1}^n r_i^2(j) \quad (4.4)$$

Où: QLT (j) est la qualité de la représentation du paramètre j (%); r_i est le coefficient de corrélation entre le paramètre j et l'axe factoriel et n est le nombre d'axes factoriels considérés.

3.5.1. Nombre d'axes à retenir

Plusieurs méthodes existent pour limiter le nombre de composantes principales à retenir. Entre autre on peut citer les tests empiriques suivants :

1. On peut ne retenir que les valeurs propres les plus grandes dont la somme représente un certain pourcentage de la variance totale.
2. Kaiser propose de ne retenir que les composantes principales dont les valeurs propres sont supérieures à 1.
3. Une méthode graphique permet de limiter le nombre de composantes à retenir, sur un graphe, donnant le numéro d'ordre des composantes principales en fonction de leur pourcentage des variances expliquées ; le point d'inflexion de la courbe obtenue permet de fixer le choix des composantes à retenir.

3.5.2. L'A. C. P

Le maximum d'information se trouve dans la 1^{ère} composante. Cette dernière décrit l'effet de masse. La majorité des stations ont tendance à décrire un ensemble commun.

Une deuxième étape consiste à déterminer un second axe factoriel, orthogonal au premier, correspondant au deuxième allongement du nuage. La représentation du nuage dans le plan principal 1-2 est la meilleure photographie en deux dimensions du nuage. Le même processus s'applique pour rechercher une troisième composante principale, une quatrième, etc. Il y a autant de composantes principales potentielles que de variables.

L'A.C.P. consiste donc à opérer un changement de repère. Les axes sont désormais les facteurs (les composantes principales) qui ont l'avantage de ne pas être corrélés entre eux et d'être hiérarchisés

3.6. Analyses des résultats

En vue d'étudier la régionalisation des précipitations de la région d'étude, une A.C.P a été appliquée aux totaux annuels pluviométriques des 16 stations de notre zone d'étude. Les résultats de l'A.C.P sont représentés dans le tableau (3.4). Le seuil de signification considéré

pour $p < 0,05$ est égal à 0,50 après un test t-Student ($S = 1.96/(n - 1)^{0.5}$ avec $n = 16$ stations). Le choix du nombre des composantes a été fixé à 3 en se basant sur le premier critère cité ci-dessus. Les contributions de la première, deuxième et troisième composantes à la variance totale sont 58,53 %, 20.16 % et 11 %, respectivement. Cependant celle de la quatrième composante est relativement basse avec valeur propre de 0.6 et un 8 % de variabilité. Cependant, seuls les trois premiers sont considérés pour décrire les caractéristiques de la variabilité de précipitations annuelles correspondantes. Le tableau (3.4) donne la répartition des différentes valeurs propres, ce choix est en accord avec l'autre critère cité antérieurement c'est-à-dire les valeurs propres les plus grandes dont la somme représente un certain pourcentage de la variance totale. D'après ce tableau, on constate que les trois premières composantes expliquent près de 90 % de la variance totale, et nous n'avons donc que 10 % de perte d'information. La première composante F1, qui explique 58.53 % de la variance est la plus importante; elle fait apparaître un district plus ou moins homogène, couvrant le Nord de notre zone d'étude (Figure 3.13).

Tableau 3.4: Résultats de l'Analyse en composantes principales

	F1	F2	F3
Valeur propre	4.682	1.613	0.90
%Variance	58.529	20.157	11.00
% cumulé	58.529	78.686	89.686

Et la deuxième composante qui explique 20.15 % de la variance met en évidence une deuxième région, longeant la première région à partir de Souk-Ahras. Il ressort que les stations les mieux représentées sont celle de Messloul, Tébessa et OuledHamza puisqu'elles possèdent la plus grande saturation (Figure 3.14). Quant à la troisième composante qui explique plus de 10.98% de la variance, elle représente les stations situées à l'Est de la région (Figure 3.15). Ces différents résultats permettent de diviser notre région d'étude en trois secteurs. Si on compare les coefficients de corrélation des stations avec la première composante principale on voit que l'influence de cette composante n'est pas la même pour toutes les stations; par exemple la variance expliquée par la première composante est de 0.944 pour la station de AinSenour et de seulement 0.79 pour la station de Souk-Ahras. Pour chaque

région on a trouvé par la méthode des composantes principales, des groupes de stations ayant un comportement semblable.

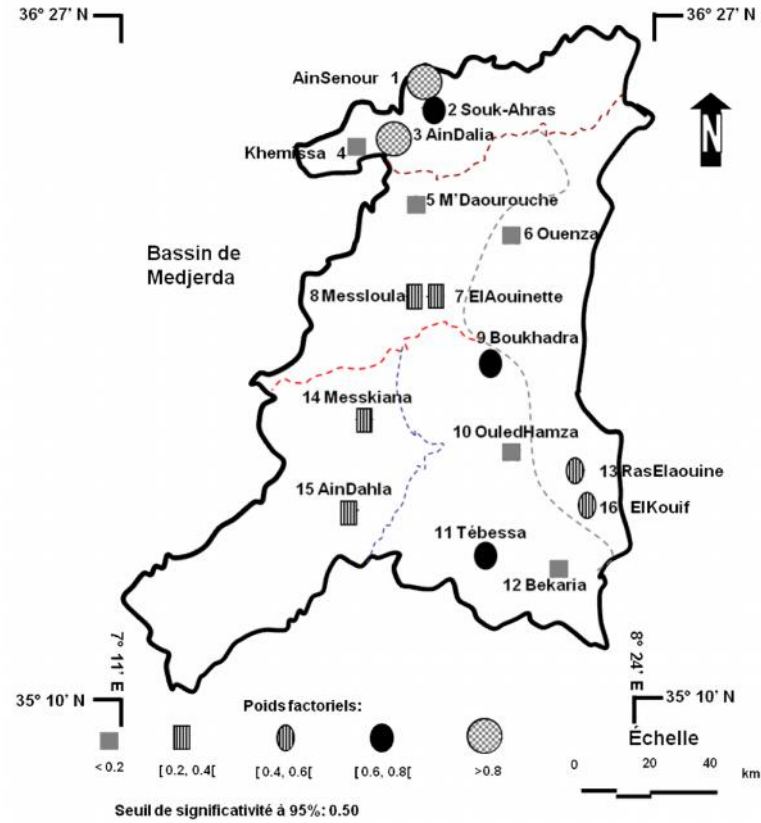


Figure 3.13 : Cartographie de la première composante principale

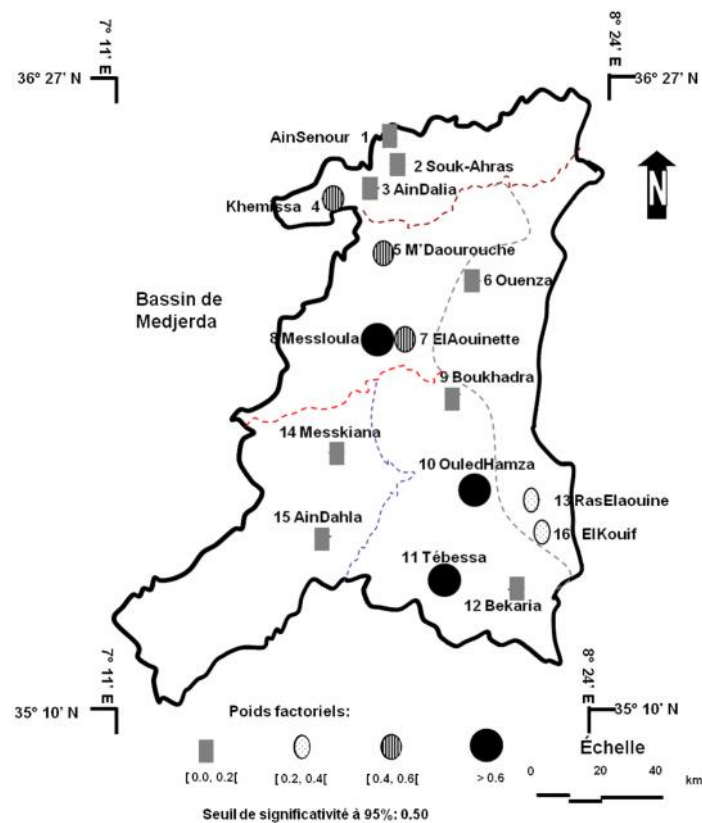


Figure 3.14: Cartographie de la deuxième composante principale

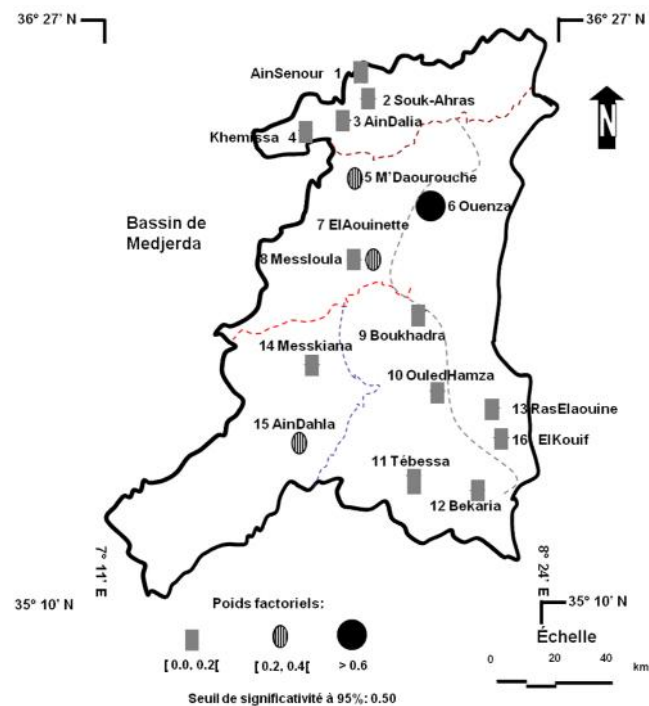


Figure 3.15: Cartographie de la troisième composante principale

L'étude des figures 3.13, 3.14, et 3.15 nous montre que les groupes divisent d'une façon distincte notre zone d'étude en trois localités (Figure 3.16).

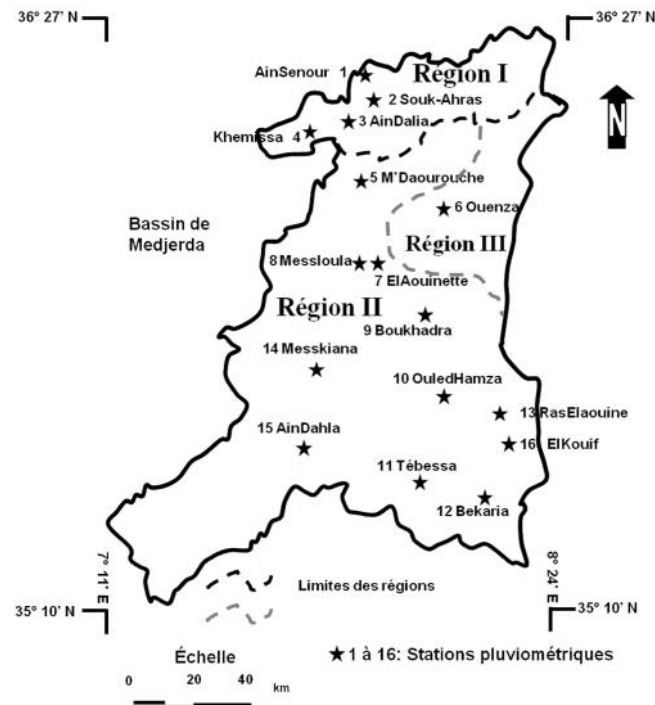


Figure 3.16: Cartographie des trois composantes principales

Chapitre 4

Etude de la persistance de la sécheresse et La relation entre la pluviométrie et l'Oscillation Nord-Atlantique

4.1. Introduction

En Algérie, en considérant les stations du nord Demmak et al, (1994) par une méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et à la moyenne de longue durée (1922-1992), 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. Et la sécheresse constitue un fléau redoutable pour l'économie des pays fondée essentiellement sur la production agricole pluviale. L'analyse de la récurrence et de la persistance de ce phénomène par des méthodes scientifiques cherche à établir une estimation des probabilités qui pourrait contribuer à la planification de stratégies de mobilisation et de gestion des ressources en eau. Par ailleurs, l'économie du pays, fondée sur l'agriculture, reste tributaire de la pluviométrie. Pour cela, des ouvrages hydrauliques ont été aménagés afin de lutter contre la sécheresse. Mais, si la sécheresse perdure deux ou trois années successives, les autorités doivent faire face à cette éventualité en planifiant les priorités de satisfaction des demandes en eau (eau potable, eau domestique, industrie, irrigation, etc.) et en adaptant la capacité des réservoirs de stockage de l'eau (Djellouli et Daget., 1993). Or, la fréquence relative d'un événement comme la sécheresse annuelle peut être étudiée en termes de probabilité. Pour décrire la persistance de la sécheresse, nous allons appliquer la méthode des chaînes de Markov à des données pluviométriques annuelles dans le Nord Est Algérie cas du bassin versant de Medjerda. Et enfin, la recherche se base sur les causes possibles de l'occurrence de cette sécheresse par l'étude de la relation entre la pluviométrie et l'oscillation nord-atlantique de la zone.

4. 2. Variabilité interannuelles des pluies

L'une des caractéristiques principales de la pluviométrie, dans notre région, est sa grande variabilité interannuelle. En effet, d'une année à l'autre le total annuel peut varier fortement. Ceci nous a conduit à une étude détaillée de la variabilité interannuelle des précipitations. Dans cette partie, nous avons axé notre travail sur trois stations qui seront considérée comme stations types, chacune décrit une zone plus au moins homogène de notre région d'étude (Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza), puisqu'elles présentent des fortes saturations.

Tableau 4.1 : Analyse des précipitations interannuelles a Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza (période d'étude 1969-2007)						
Nom de la station	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation
Souk-Ahras	930.0	164.6	554.48	192.18	559.70	35 %
Ouenza	498.7	33.8	261.07	94.97	262.5	36 %
Tébessa	624.0	185.0	351.44	122.72	315.40	35 %

Le tableau 4.1 caractérise bien cette variabilité interannuelle. Le coefficient de variation représente bien cette variabilité relative et qui a dépassé les 30 %. Ce même tableau montre que les moyennes des trois stations sont assez proches des médianes et montre que la loi de distribution est symétrique.

Pour une analyse plus détaillée, nous allons caractériser la variabilité interannuelle par les variables des totaux annuels. La figure 5.1 représente cette variabilité interannuelle des précipitations à Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza pour la période 1969/1970-2006/2007, on y remarque la concordance des années déficitaires des trois stations.

Par ailleurs, nous observons à travers les mêmes figures, des excédents pluviométriques relatifs à l'année 2002-2003 pour la station de Souk-Ahras, l'année 1971-1972 pour la station d'Ouenza, et 1994-1995 pour la station de Tébessa. Il est à remarquer aussi que chacune des trois stations représente un record de déficit. En ce qui concerne Souk-Ahras, le déficit de 1985-1986-1987, 1991-1992-1993 est le plus bas sur les 38 années. Tandis qu'à Tébessa le déficit le plus bas sur les 38 observations est de 1981-1982, 1991-1992-1993. A l'Ouenza le déficit de 1991-1992-1993 est aussi le plus bas sur les 38 observations.

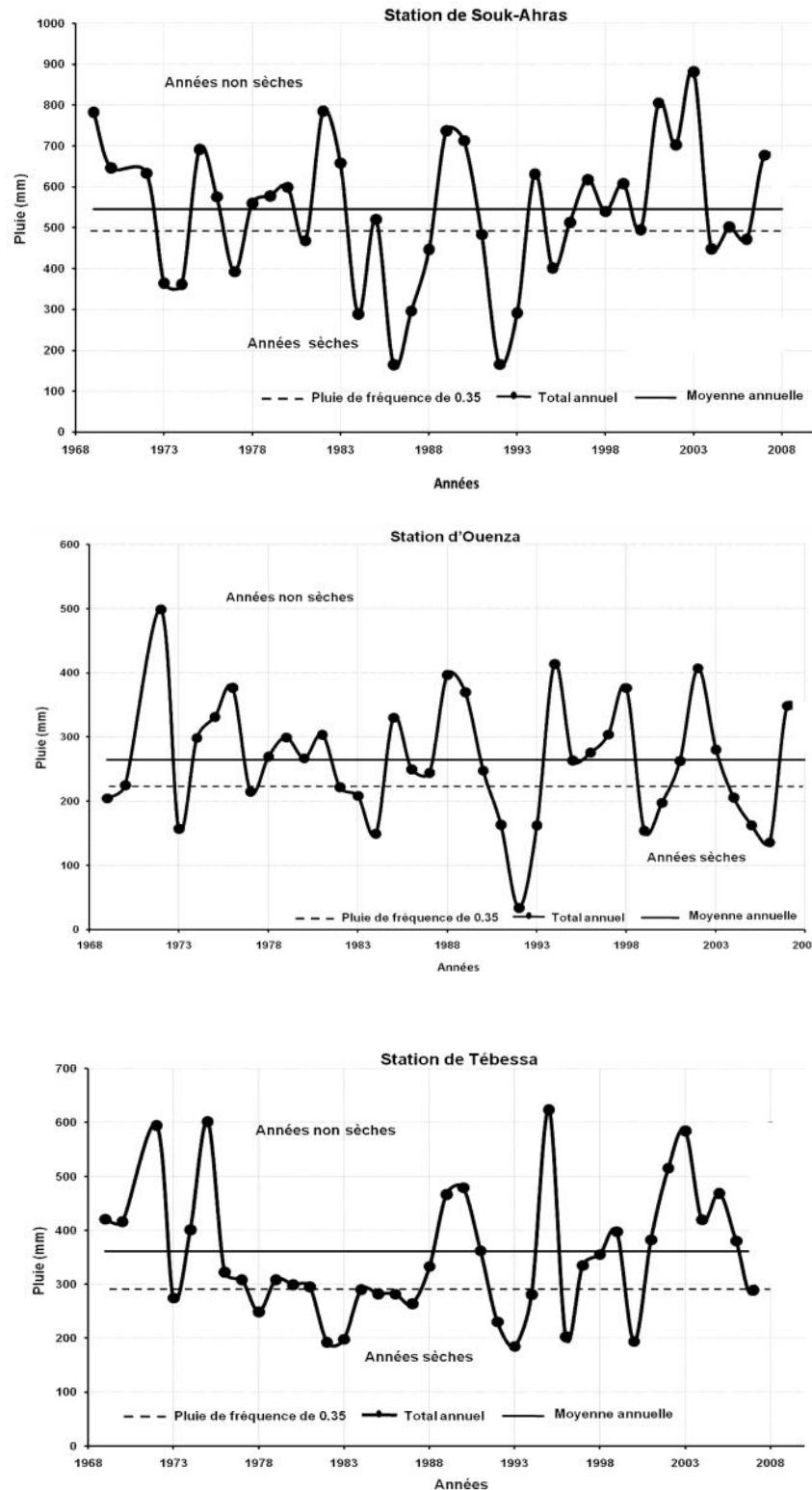


Figure 4.1: Variation interannuelle des précipitations (Souk-Ahras, Tébessa, Ouenza).

Nous remarquons que les années 1991-1992-1993 sont les années les plus déficitaires pour toute la zone d'étude. Ces graphiques confirment l'apparition et la persistance d'une sécheresse durant les deux décennies 80 et 90. Dans ce qui suit nous allons étudier la tendance climatique de nos séries

4. 3. Etude de la tendance climatique

Les formes que risquent de prendre les tendances climatiques et les changements climatiques qui peuvent correspondre sont décrites de façon différente selon les auteurs. Dès 1966 l'organisation météorologique mondiale a essayé d'unifier la définition de la tendance. La tendance climatique est un changement climatique caractérisé par une diminution ou un accroissement significatif régulier monotone des valeurs moyennes durant la période de relevé. Plusieurs tests existent pour mettre en évidence l'existence éventuelle d'une tendance, on peut citer ceux préconisés par la note 143 de l'organisation mondiale de la météorologie.

4. 3.1. Test de Spearman

On calcule la corrélation entre la chronologie (i) et le rang des valeurs de la série. Plus la corrélation est grande et plus elle est significative. Ce coefficient est donné par l'expression:

$$r = 1 - \left(6 \sum_{i=1}^n (y_i - i)^2 / n(n^2 - 1) \right) \quad (4.1)$$

i : la chronologie.

Y_i : le rang.

4. 3.2. Test de Mann Kendall

Soit la série X_i , i variant de 1 à n . On calcule pour chaque élément, le nombre d'élément qui le précède et qui lui sont inférieurs et l'on fait la somme de ces nombres (t). Plus (t) est grand et plus l'organisation de la série est importante. La variable (t) est distribuée selon une loi normale avec :

$$E(t) = n \times (n - 1) / 4 \quad (4.2)$$

$$Var(t) = n \times (n - 1) \times (2n + 5) / 72 \quad (4.3)$$

On cherche la probabilité $\sim_1$ à l'aide de la loi normale centrée réduite tel que:

$$(4.4) \sim_1 = \text{pro}(|u| > u(t))$$

Avec:
$$u(t) = (t - E(t)) / \sqrt{\text{Var}(t)} \quad (4.5)$$

L'hypothèse nulle (absence de tendance) est acceptée ou rejetée au niveau de signification α_0 pour un seuil de 0.05 selon que l'on a $u_1 > \alpha_0$ ou $u_1 < -\alpha_0$

Lorsque les valeurs de $u(t)$ sont significatives (Sneyers.R, 1975), on conclut à une tendance croissante ou décroissante selon que $u(t)$ est positif ou négatif. Il reste à souligner que l'un et l'autre de ces tests possèdent la même efficacité. Toute fois, lorsqu'une série présente une tendance significative et que l'on désire situer l'époque à partir de laquelle la tendance s'est manifestée, la statistique du second test (Mann Kendall) se prête mieux au calcul progressif et rétrograde nécessaire à cet effet. On fait la même procédure qu'avant, en inversant la direction du calcul; la variable $u(t)$ obtenue est appelée série rétrograde. Le point d'intersection de $-u(t')$ avec $u(t')$ donne le début de la tendance. Nous allons faire cette étude sur les mêmes stations utilisées antérieurement dans l'analyse de la variabilité interannuelle.

4.3.3. Analyses des résultats

Pour tester la tendance et détecter le début de cette dernière, nous avons utilisé le test de Mann Kendall. Les résultats obtenus sur les trois stations sont donnés dans le tableau 4.2. La statistique du test montre que la tendance est négative pour les trois stations, mais elle est fortement significative sur Tébessa et Souk-Ahras. L'observation de la figure 4.2 confirme l'apparition d'une tendance négative à partir des années soixante-dix et qui persiste durant les deux décennies 80 et 90. Même la figure 4.1 montre que les stations présentent une pluviométrie inférieure à la normale durant la plupart des années sur ces deux dernières décennies.

Tableau 4.2 : Test statistique de tendance des séries pluviométriques			
Nom de la station	La statistique u (t)	Seuil de signification	Début de la dernière tendance
Souk-Ahras	-2.47	-1.96	1976/1977
Ouenza	-1.95	-1.96	1975/1976
Tébessa	-2.82	-1.96	1975/1976

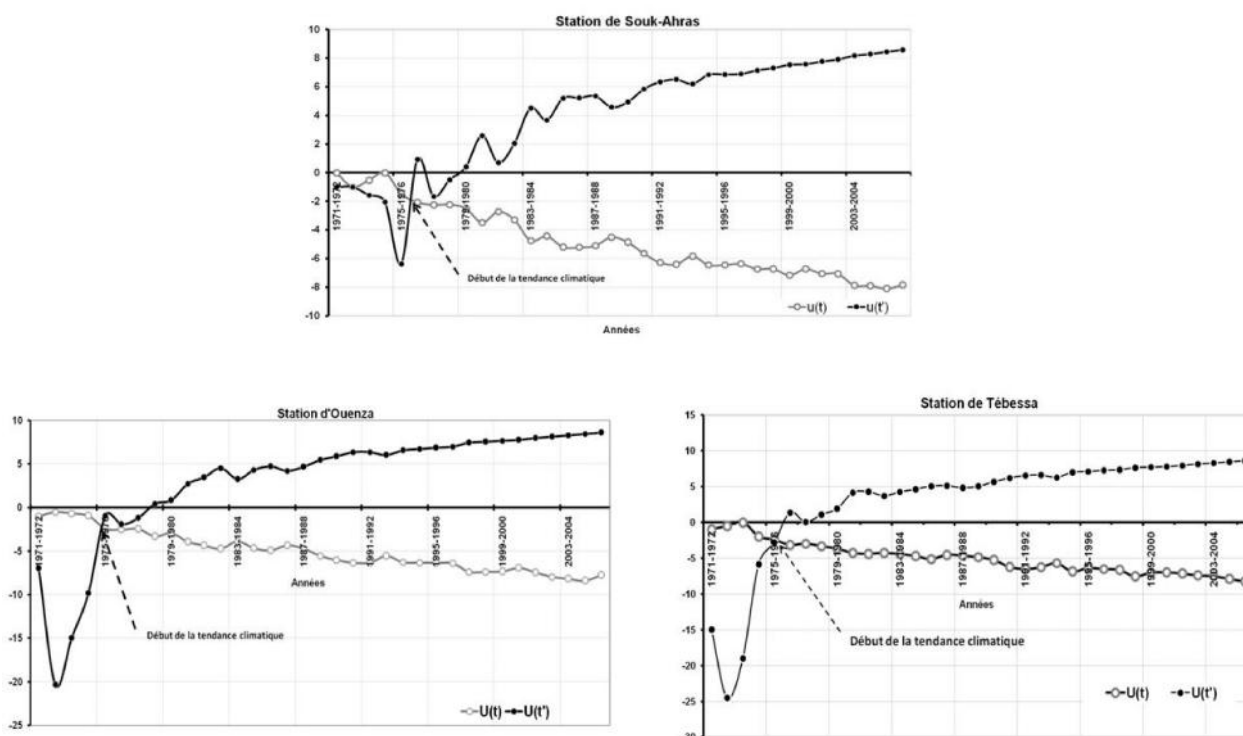


Figure 4.2 : Etude de la tendance des trois stations (Souk-Ahras, Tébessa, Ouenza).

Les résultats de cette étude ont montré l'apparition d'un déficit pluviométrique à partir des années soixante-dix. Ce déficit persiste actuellement et génère des graves répercussions d'ordre économique et social, compte tenu de la pression croissante qui s'exerce sur la ressource en eau (alimentation en eau potable, irrigation...). Ce qui confirme les résultats trouvés par (Meddi et Hubert; 2000 ; 2003), (Meddi et al ; 2002).

4.4. Etude de la variabilité intra-annuelle

Nous venons d'analyser la variabilité interannuelle, c'est à dire entre les années. Nous étudions à présent la variabilité des saisons. En effet, on se demande si la baisse pluviométrique mise en évidence précédemment est due à une saison donnée. Sur le plan agronomique, un déficit hydrique n'aura pas les mêmes conséquences, selon qu'il intervient au début de la campagne ou pendant les différentes phases du cycle.

4.4.1. La variabilité saisonnière

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons. Pour cette analyse,

nous allons utiliser la moyenne mobile (une méthode de filtrage), et qui permet de mieux visualiser la chronologie des totaux de pluie saisonniers dans le temps.

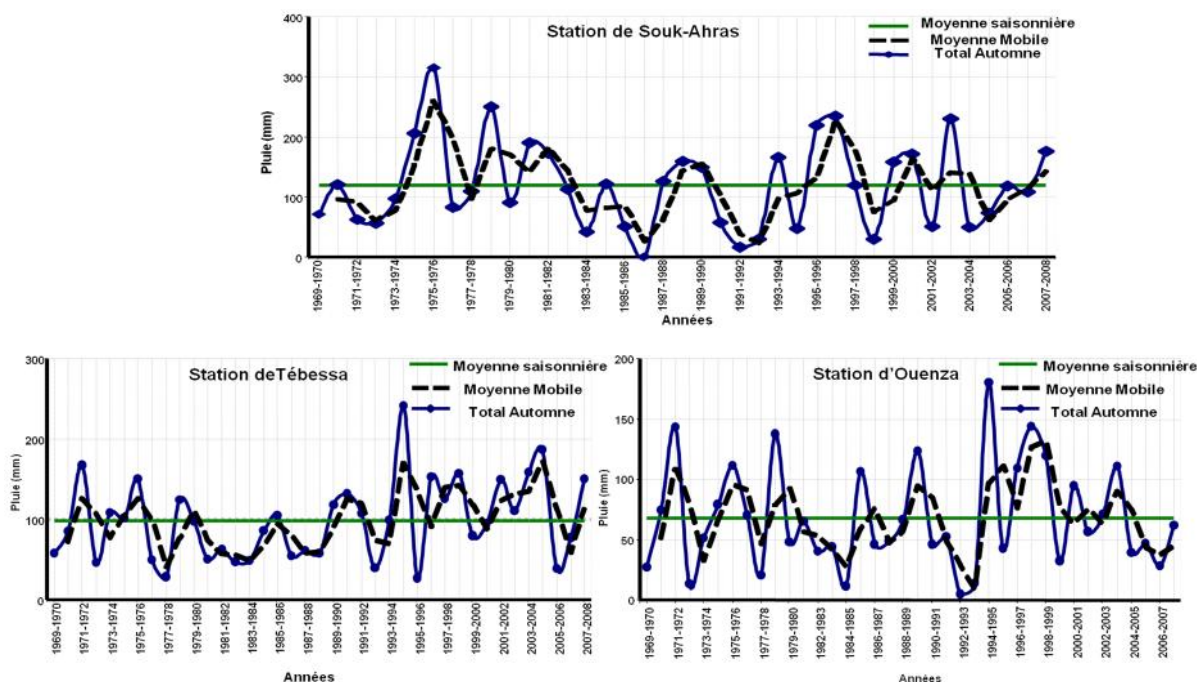


Figure 4.3 : Evolution des totaux d'automne avec leur moyenne mobile dans les trois stations (Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza).

Cette étude s'est bornée aux trois saisons (l'automne, l'hiver et le printemps). Les figures 4.3 et 4.4, traduisent l'évolution des totaux saisonniers pour les trois stations. Elles montrent la fluctuation autour de la moyenne des totaux de pluie d'automne, qui sont en nette baisse dès la mi décennie 80, et début de la décennie 90, ceci apparaît très nettement pour les stations de Souk-Ahras et Tébessa. Pour la saison d'hiver, on note une baisse pour les trois stations dès la décennie 80, avec une reprise à sa fin, et vers un retour à la baisse une deuxième fois. La saison du printemps a connu aussi des variations assez semblables pour les trois stations, de sorte qu'on observe, une baisse de pluie durant les deux décennies 80 et 90 avec une tendance apparente et vers un retour des pluies vers la décennie 2000.

Donc, on peut conclure que la tendance à la baisse de la pluviométrie pour les trois stations durant les deux décennies 80 et 90 est principalement occasionnée par une baisse des pluies du printemps et plus particulièrement celles de l'hiver.

Le tableau 4.3, donne les moyennes hivernales et printanières pour les trois stations, en considérant les deux périodes (1969-1974), (1975-2007) pour les stations de Tébessa et Ouenza et (1969-1975), (1976-2007) pour la station de Souk-Ahras.

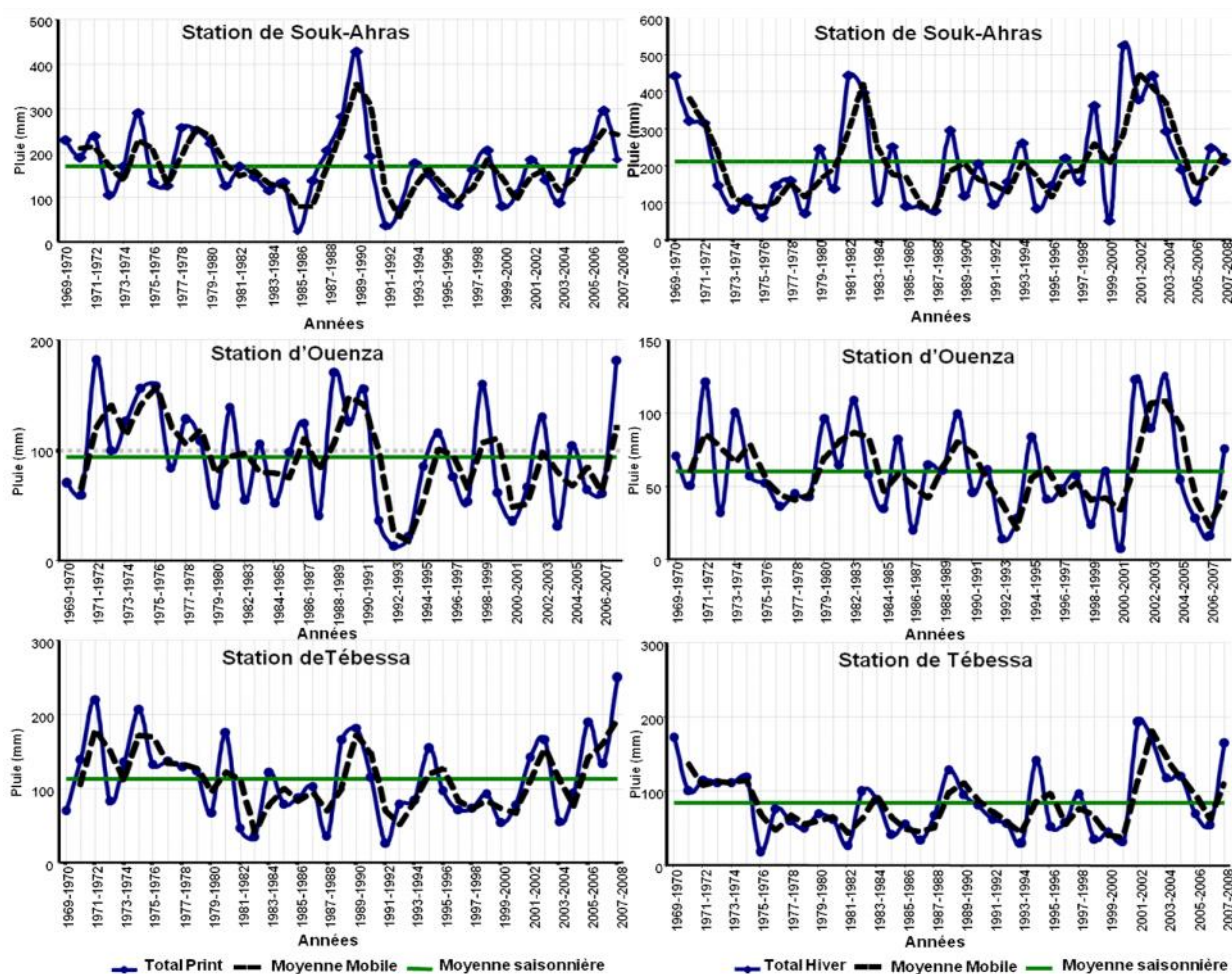


Figure 4.4 : Evolution des totaux hivernaux et printaniers avec leur moyenne mobile dans les trois stations (Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza).

Tableau 4.3 : Analyses des moyennes hivernales et printanières sur les deux périodes; 1969-1975 / 1976-2007 stations de (Tébessa et Ouenza) et 1969-1976 / 1977-2007 station de Souk-Ahras.

Nom des stations	Hiver		Printemps	
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂
Souk-Ahras	211.23	201	193.56	165.57
Tébessa	142.46	108.43	121.53	77.20
Ouenza	35.66	17	37.59	33.7

Ce dernier montre que, la moyenne pour la deuxième période est toujours inférieure par rapport à celle de la première, en considérant les deux saisons. Toutefois, la saison de l'hiver pour la station de Souk-Ahras la différence n'est point significative.

4.5. Etude de la persistance de la sécheresse

La sécheresse se définit par un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée. En réalité, il existe différents types de sécheresse (White et O'Meagher, 1995) :

- La sécheresse climatologique essentiellement liée au déficit pluviométrique ;
- La sécheresse agronomique qui fait appel au déficit de la réserve hydrique du sol et à l'état d'avancement de la végétation ;
- La sécheresse hydrologique ou hydrogéologique qui se manifeste par des étiages anormaux et un abaissement prononcé des nappes.

C'est la sécheresse climatologique qui nous semble déterminer les autres types de sécheresse. La réduction des précipitations se répercute nécessairement sur le milieu environnant. La sécheresse est « une décroissance des disponibilités en eau pour une époque particulière et sur une région particulière » (Beran., 1987). Ainsi la notion de sécheresse est-elle relative. Une sécheresse absolue et durable correspond à de l'aridité (Roche, 1986). Sous le climat méditerranéen, la sécheresse est récurrente, omniprésente en raison de températures élevées et d'une pluviométrie modeste et surtout très variable (Hénia., 1993). Éphémère, la sécheresse peut affecter un mois, une saison ou une année. Elle devient redoutable quand elle persiste deux ou trois années successives. C'est pour cela que nous avons choisi d'axer notre étude sur la persistance de la sécheresse à l'échelle annuelle.

Le niveau du déficit hydrique à partir duquel on peut dire qu'il y a sécheresse a constitué souvent une difficulté majeure pour les chercheurs. Certains auteurs, qui ont étudié la sécheresse à partir de données climatiques, suggèrent des seuils arbitraires de pluviométrie: 10% de la moyenne pour le Goff (Morel., 1999), ou le dernier décile pour Meko(1985). Pour estimer l'intensité du déficit pluviométrique plusieurs indices dont la majorité prennent comme référence la valeur la plus fréquente qui est généralement la moyenne climatologique, ou l'analyse fréquentielle grâce à laquelle on peut calculer des seuils de sécheresse. D'une façon générale, le seuil de sécheresse est choisi selon la sévérité désirée puisqu'il n'existe pas de règle préalable. Au commencement et pour cette analyse, notre choix s'est porté sur l'utilisation de la méthode des quintiles, de l'analyse fréquentielle et la méthode de chaînes de Markov. Avec ces trois méthodes, le calcul peut se faire en se basant sur la loi de probabilité adéquate aux séries d'observations. L'utilisation de la loi de probabilité permet d'estimer plus correctement les différents quintiles et calculer leurs durées de retour. Pour la méthode des

quintiles, le seuil d'années sèches est observé en moyenne tous les 2.5 ans et les très sèches tous les 5 ans. Avant d'aborder cette analyse, il nous a paru très intéressant de vérifier la normalité de nos séries.

4. 5.1. Test de normalité

Pour tester la normalité des séries, il existe deux méthodes :

Test graphique: consiste à tracer sur un papier de Gauss la courbe théorique et la courbe empirique et de les comparer.

Test analytique: parmi les tests analytiques de normalité des séries, on a le test de khi deux (X_2), le test de Kolmogorov, et on peut aussi utiliser un test qui considère les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Le test de khi deux mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du X_2 . On utilise le test de X_2 pour déterminer si une distribution théorique comme la distribution normale, peut ajuster une distribution empirique, c'est à dire une distribution calculée à partir des données observées. La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus adéquate à nos séries pluviométriques annuelles.

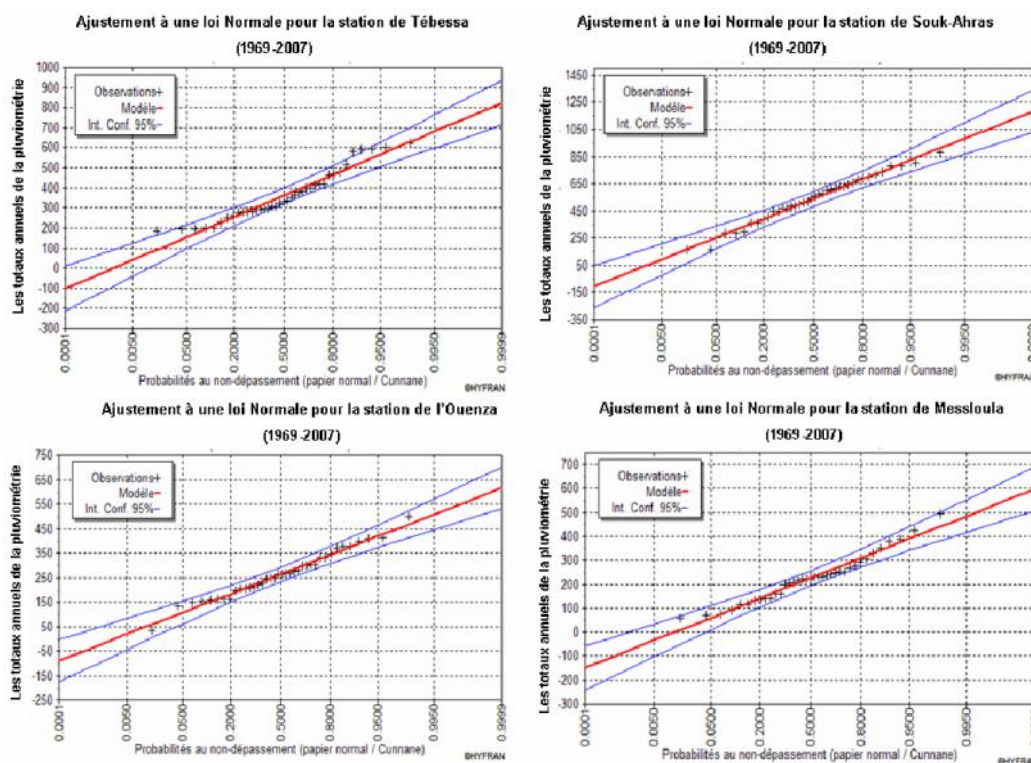


Figure 4.5 : Ajustement à une loi normale pour les stations de la zone d'étude.

De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale, tout spécialement dans le cas des grands échantillons. Plusieurs travaux réalisés au niveau de plusieurs instituts (IHFR, ANRH...) ont montré que la loi normale ajuste bien les séries pluviométriques du nord de l'Algérie. Pour notre cas, nous allons appliquer le test graphique sur les quatre stations représentant le bassin versant; c'est à dire la station de Souk-Ahras, de Messloul, de l'Ouenza, et Tébessa en utilisant le logiciel Hyfran. (Hélène L., 1994)

A partir de la figure 4.5, on remarque que la loi normale ajuste bien les séries de notre zone d'étude à un seuil de probabilité égale à 0.05.

4.5.2. Etude des séquences sèches

4.5.2.1. La méthode des quintiles

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment cette méthode tient compte de la loi de distribution de l'échantillon, et elle suppose aussi une période de retour est égale à 2.5 ans pour une année sèche et 5ans pour une année très sèche. Afin de considérer un maximum d'information, et faire une analyse détaillée, nous avons également tenu compte d'une période commune s'étalant de 1969-1970 à 2006-2007 pour les trois stations qui présentent notre région d'étude. Le tableau 4.4, donne les valeurs des seuils pluviométriques pour nos stations, en considérant les critères cités auparavant: T=5ans pour une année très sèche et T=2.5 ans pour une année sèche. Le seuil des années sèches et très sèches est plus proche pour les stations de Tébessa et Ouenza; par contre si on considère la station de Souk-Ahras, il atteint 300 mm pour les années très sèches et 480 mm pour les années sèches.

Pour les années normales la plage variée d'une station à une autre. En examinant le tableau 4.4, on constate aussi, une diminution du seuil des années humides et très humides si nous allons de Souk-Ahras vers Tébessa et de Souk-Ahras vers Ouenza.

Tableau 4.4 : Seuils des années sèches, très sèches, humides et très humides ; par la méthode des quintiles, période (1969-2007)

Les stations	Années très sèches	Années sèches	Années normales	Années humides	Années très humides
Souk-Ahras	300 mm	480 mm	$480 < X_i < 620$	620 mm	700 mm
Tébessa	200 mm	290 mm	$290 < X_i < 400$	400 mm	515 mm
Ouenza	157 mm	215 mm	$215 < X_i < 298$	298 mm	376 mm

En considérant les résultats mis en évidence par l'étude de la tendance climatique, nous allons calculer la fréquence des années sèches et très sèches. En partageant notre période d'étude en deux, une avant la tendance et l'autre après la tendance.

Le tableau 4.5, montre que pour la première période la fréquence des années sèches varie de 14.28 % pour la station d'Ouenza à 28.5 % pour Souk-Ahras.

Tableau 4.5 : Statistiques des années sèches et pluvieuses par la méthode des quintiles											
Les stations	Période	Années sèches		Années très sèches		Années normales		Années humides		Années très humides	
		Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Souk-Ahras	1969-1976	2	28.57	0	0	1	14.28	3	42.85	1	14.28
	1976-2007	7	21.87	5	15.62	10	34.37	4	12.5	4	15.62
Tébessa	1969-1975	2	16.66	0	0	0	0	3	50	2	33.33
	1975-2007	8	24.24	5	15.15	11	36.36	4	12.12	3	12.12
Ouenza	1969-1975	1	16.66	1	16.66	2	33.33	1	16.66	1	16.66
	1975-2007	7	21.87	4	12.5	10	31.25	6	18.75	4	15.62

Les années très sèches, pour cette même période, ont une fréquence nulle pour les stations Souk-Ahras et Tébessa. Les années humides et très humides sont très fréquentes et ce pourcentage varie d'une station à une autre. Pour la deuxième période, le nombre des années sèches et très sèches est devenu plus important pour les trois stations représentant notre région d'étude. Tandis que le nombre d'années humides et très humides a diminué. Pour une nouvelle optique, nous avons également recensé pour chaque décennie les années sèches, très sèches, normales, humides et très humides. Le tableau 4.6 montre que, le plus grand nombre

Tableau 4.6 : Statistiques des années sèches et pluvieuses pour chaque décennie (méthode des quintiles)											
Les stations	Période	Années sèches		Années très sèches		Années normales		Années humides		Années très humides	
		Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Souk-Ahras	1970-1980	3	30	0	00	4	40	3	30	1	10
	1980-1990	2	20	3	30	1	10	1	10	3	30
	1990-2000	2	20	2	20	5	50	1	10	0	00
	2000-2007	2	25	0	00	2	25	1	12.5	2	25
Tébessa	1970-1980	2	20	0	00	4	40	3	30	2	20
	1980-1990	4	40	2	20	2	20	2	20	0	00
	1990-2000	2	20	3	30	4	40	0	00	1	10
	2000-2007	2	25	0	00	2	25	1	12.5	2	25
Ouenza	1970-1980	2	20	1	10	4	40	2	20	2	20
	1980-1990	1	10	1	10	3	30	4	40	1	10
	1990-2000	2	20	2	20	3	30	1	10	2	20
	2000-2007	3	37.5	1	12.5	1	12.5	1	12.5	1	12.5

d'années déficitaires c'est à dire sèches s'observe durant les trois dernières décennies pour les trois stations, et très sèches s'observe durant les décennies 80 et 90 pour les trois stations. Les résultats obtenus par cette méthode (quintile) confirment la persistance des années déficitaires et leurs successions durant les deux dernières décennies 80 et 90.

4.5.2.2. La méthode de l'analyse fréquentielle

En plus de la méthode des quintiles, l'analyse fréquentielle nous permet en revanche de distinguer parmi les années sèches celles qui sont les plus déficitaires. Les pluies annuelles sont classées dans l'ordre croissant suivant leur probabilité au non-dépassement puis divisées en cinq classes (Tableau 4.7).

Tableau 4.7 : Classe de sécheresse en fonction des fréquences.	
Classes	Fréquence ou probabilité au non dépassement
Très sèches	$F < 0.15$
Sèches	$0.15 < F < 0.35$
Normales	$0.35 < F < 0.65$
Humides	$0.65 < F < 0.85$
Très humides	$F \geq 0.85$

La représentation graphique (figure 4.1) des pluies annuelles de la zone d'étude dans l'ordre chronologique et de la pluie de fréquence 0,35 permet de dénombrer facilement et rapidement les années sèches isolées et les années successives sèches de durée deux ou trois années, etc. Nous remarquons d'après la figure 4.1 que, la succession de trois années sèches se localise dans les décennies 80 et 90 pour les trois stations. La représentation graphique de ces fréquences en fonction des pluies sur la figure 4.6 fait apparaître un gradient régional latitudinal nord-sud très net mais un gradient est-ouest variable suivant les régions et suivant les fréquences.

Le gradient latitudinal atteint, une valeur de 50 % entre le Nord (Souk-Ahras) et Centre- est (Ouenza) et de 60 % entre Centre- est (Ouenza) et le Sud(Tébessa).

Dans le sens horizontal, le gradient Ouest-est est très faible au Nord (10 %) mais très fort au Sud où, à l'inverse du Nord de la zone d'étude, le Nord est plus pluvieux que le Sud et le gradient s'élève à 60 %.

On remarque une nette augmentation des déficits du sud vers le nord. Cette variation peut être mise en rapport avec la répartition des coefficients de variation signalés plus haut (Tableau 4.1).

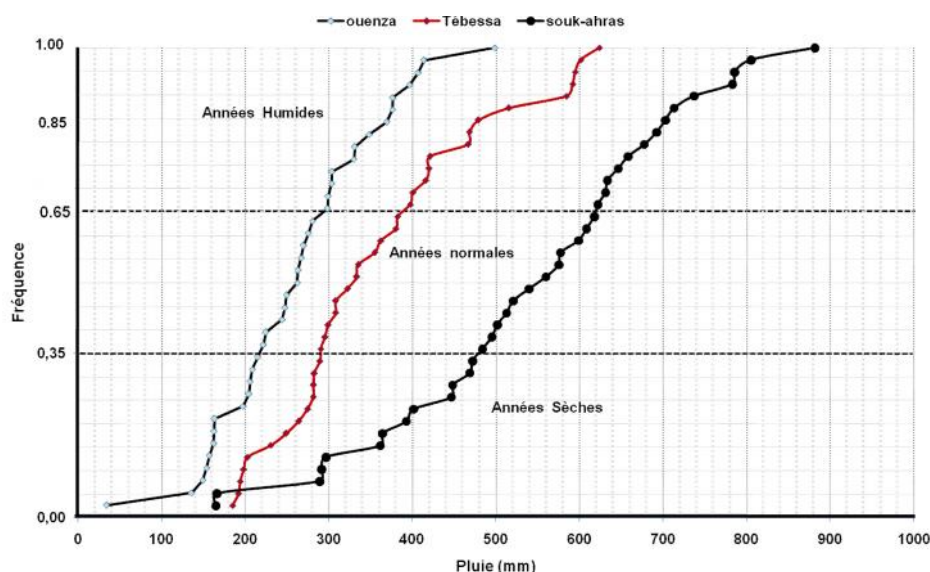


Figure 4.6 : Courbes de fréquences des trois stations.

4.5.2.3. Etude des séquences sèches par l'application des chaînes de Markov

La méthodologie des chaînes de Markov permet de déterminer ou de prévoir la probabilité d'avoir une année sèche après une année sèche ou non. Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille (année précédente) à l'état de l'année en cours. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des chaînes de Markov (Arnaud., 1985). Les chaînes de Markov tiennent compte de la liaison entre les années successives; en effet la pluie de l'année k dépend de l'état des années passées. Ce modèle sera du premier ordre si la pluie de l'année k ne dépend que de l'année précédente, c'est-à-dire du passé le plus proche de l'état. Il sera d'ordre h si la pluie de l'année k dépend des $k - 1, k - 2, \dots, k - h$ années passées.

Le modèle des chaînes de Markov est un modèle stochastique, itératif. Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille (année précédente) à l'état de l'année en cours. Ainsi l'état de l'année k ne dépend que de l'état de l'année $k - 1$ pour le processus de Markov d'ordre 1. Il dépend des états $k - 1$ et $k - 2$ pour le processus de Markov d'ordre 2. Une année peut être caractérisée du point de vue pluviométrique par deux états:

- état 0 : présence de la sécheresse (années sèche ou très sèche).
- état 1 : absence de la sécheresse (années normale, humide et très humide).

4.5.2.3.1. Le processus de Markov d'ordre 1

Pour le processus d'ordre 1, quatre situations sont possibles (Tableau 4.8).

Où : $A_{i0} + A_{i1} = 1$ pour $i = 0$ ou 1 .

Tableau 4.8 : Processus de Markov d'ordre 1		
Etat au jour k-1	Etat au jour k	
	0	1
0	A00	A01
1	A10	A11

Ces indices A_i peuvent être exprimés en termes de probabilités.

P_i étant la probabilité marginale de l'état i , nous pouvons déduire les relations suivantes :

$$A_i = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad P_i = \frac{N_i}{N} \quad (4.6)$$

Où N_i est le nombre d'années de l'état i ;

et N est le nombre d'années d'observations. La probabilité marginale P_0 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_0 = \frac{A_{10}}{(1 - A_{00} + A_{10})} \quad (4.7)$$

4.5.2.3.2. Le processus de Markov d'ordre 2

Dans ce cas, l'état de l'année k dépend de l'état de l'année $k-1$ et de l'état de l'année $k-2$. La matrice de passage de la chaîne de Markov d'ordre 2 s'écrit comme indiqué dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Processus de Markov d'ordre 2				
Etat du jour k-2	Etat du jour k-1 et k			
	00	01	10	11
00	B000	B001	0	0
01	0	0	B010	B011
10	B100	B101	0	0
11	0	0	B110	B111

Où B_{ijk} représente la probabilité conditionnelle d'obtenir un doublet de classe (j, k) succédant à un doublet de classe (i, j) .

Avec :

$$\sum B_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{ij}} \quad \sum_{k=0}^1 B_{ijk} = 1 \quad (4.8)$$

Contrairement à l'ordre 1, certains zéros apparaissent à cause de l'impossibilité de certaines successions de doublets.

Pour chaque région, nous calculerons la matrice de Markov en donnant plus d'importance aux coefficients B000, B001, B100 et B101.

4.5.3.1. Application du Modèle Markov d'ordre 1 sur nos stations

La matrice de Markov d'ordre 1 a été calculée. Les résultats sont indiqués dans le tableau 4.10.

À la suite de l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 1, la probabilité d'avoir une année sèche après une année de départ sèche varie de 43 à 57 % pour les trois stations, elle est importante au Sud (Ouenza, Tébessa) que dans la partie Nord du bassin (Souk-Ahras). En revanche, la probabilité d'avoir une année sèche après une année non sèche est faible (inférieure à 40 %) pour toute la zone d'étude. Si une année est sèche, la probabilité d'avoir une année non sèche l'année suivante est importante pour l'ensemble des stations (supérieur ou égale à 50 %).

Tableau 4.10: Processus de Markov d'ordre 1 pour chaque station pour la période (1969-2007).				
Station	Probabilité conditionnelle %			
	S-S	S-NS	NS-S	NS-NS
Souk-Ahras	43	64	37.5	62.5
Tébessa	57.14	50	29.16	70.83
Ouenza	46.15	53.84	24	72

S : année sèche

NS : année non sèche

Aussi, la probabilité d'avoir deux années non sèches successives est élevée pour l'ensemble des stations. Les probabilités oscillent entre 62 et 72 %.

4.5.3.2. Application du Modèle Markov d'ordre 2 sur nos stations

Pour chaque région, nous calculons la matrice de Markov d'ordre 2 en nous intéressant essentiellement aux années sèches successives (B000, B001, B100 et B101): S-S-S (trois années sèches successives), S-S-NS (deux années sèches successives), NS-S-S (deux années

sèches successives), NS-S-NS (une année sèche isolée). L'application de l'hypothèse des chaînes de Markov donne les probabilités indiquées dans le tableau 4.11. On s'intéresse spécialement aux années sèches successives (Thirriot., 1983). Ce choix va de soi avec l'étude de la persistante de la sécheresse :

Tableau 4.11: Processus de Markov d'ordre 2 pour chaque station pour la période (1969-2007).				
Station	Probabilité conditionnelle %			
	S-S-S	S-S-NS	NS-S-S	NS-S-NS
Souk-Ahras	33.33	50	33.33	66.66
Tébessa	37.5	25	28.57	71.42
Ouenza	33.33	50	50	33.33

S : année sèche

NS : année non sèche

À la suite de l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 2, nous constatons, comme pour l'ordre 1, que pour l'ensemble de la zone d'étude et quelle que soit la composition de la séquence, la probabilité d'avoir l'année suivante une année « sèche » est partout plus faible que celle d'avoir une année « non sèche ». Si deux années successives sont sèches, la probabilité d'avoir une troisième année sèche est faible. Elle diminue du sud vers le nord. Les probabilités oscillent entre 33.33 et 37.5 %.

- Réciproquement, la probabilité d'avoir deux années sèches successives suivies d'une année « non sèche » est importante au nord et à l'est: elle est de 50 % à Souk-Ahras et Ouenza. Alors, au sud est de 25 %.
- Si une séquence se compose d'une année « non sèche » et d'une année « sèche », la probabilité d'avoir l'année suivante une année sèche, c'est-à-dire la probabilité d'avoir deux années sèches successives faisant suite à une année « non sèche », est plus importante à l'est qu'au nord et au sud: à l'est, est de 50 %. Alors que, au sud et au nord, elle varie de 28.57 à 33.33 %.
- Réciproquement, la probabilité d'avoir une année sèche isolée au milieu de deux années « non sèches » est plus importante au sud et au nord à l'est: elle varie de 66.66 à 71.42 % tandis que, à l'est, elle est de 33.33%.

L'étude a montré que la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent une année, deux années de suite, voire trois années ou plus. La probabilité d'avoir deux années sèches

consécutives est plus importante dans les régions du Nord et du Sud, régions qui participent d'une façon considérable à la production agricole du bassin d'étude. Ces résultats pourront aider à établir une stratégie de lutte contre la sécheresse. Une explication de ces processus est à rechercher dans les situations météorologiques et leur fréquence d'apparition, dans le sens de rotation des vents dans les perturbations, dans l'orientation et l'exposition aux vents pluvieux ainsi que dans l'état de la circulation atmosphérique (jet stream) en altitude.

4.6. Relation entre la Pluviométrie et l'Oscillation Nord-Atlantique

Dans notre pays, plusieurs travaux se sont penchés sur l'étude de la relation qui existe entre la sécheresse observée durant les deux dernières décennies et le phénomène ENSO « el Nino-southern oscillation »; Par ailleurs, peu nombreux sont les travaux qui s'intéressent à l'étude de la relation existante entre l'ONA et les précipitations sur le Nord Algérien. Vu sa naissance l'ONA nous concerne beaucoup plus directement, car elle étend son influence sur l'Afrique du Nord et d'autre région du monde comme l'Europe; pour cette raison, il nous a paru très intéressant d'analyser l'oscillation Nord Atlantique (ONA) pour faire le point sur la nature de relation entre cette dernière et la pluviométrie sur l'Est Algérien. Ajoutant à ce que nous avons déjà mentionné auparavant, l'oscillation nord-atlantique a été découvert en 1920 par les deux météorologues, l'Autrichien Friedrich Exner et l'Anglais Gilbert Walker, cette oscillation peut être quantifiée par un indice, l'indice ONA. Comme dans Rogers (1989), l'indice de l'oscillation nord-atlantique est défini comme la différence entre les anomalies de pressions normalisées à Lisbonne (Açores) et Reykjavik (Islande).

$$ONA_i = \left(\frac{P_i - \bar{P}}{\pm} \right)_L - \left(\frac{P_i - \bar{P}}{\pm} \right)_R \quad (4.9)$$

$\bar{P}_L$: La moyenne normalisée à Lisbonne de la pression au niveau de la surface de la mer.

$\bar{P}_R$: La moyenne normalisée à Reykjavik de la pression au niveau de la surface de la mer.

L'ONA se ramène ainsi à un chiffre compris entre -5 et +5. Quand cet indice est positif, la différence de pression est maximale, les hautes et les basses pressions sont accentuées; un indice négatif correspond au contraire à un anticyclone des Açores et une dépression islandaise faible. Ces deux états de l'oscillation nord-atlantique correspondent aux deux grands types de climats hivernaux; Un indice ONA positif avec ses pressions hautes aux Açores et basse en Islande (Figure 4.7), se manifeste par des vents forts et rapides d'ouest-sud-ouest balayant l'océan atlantique;

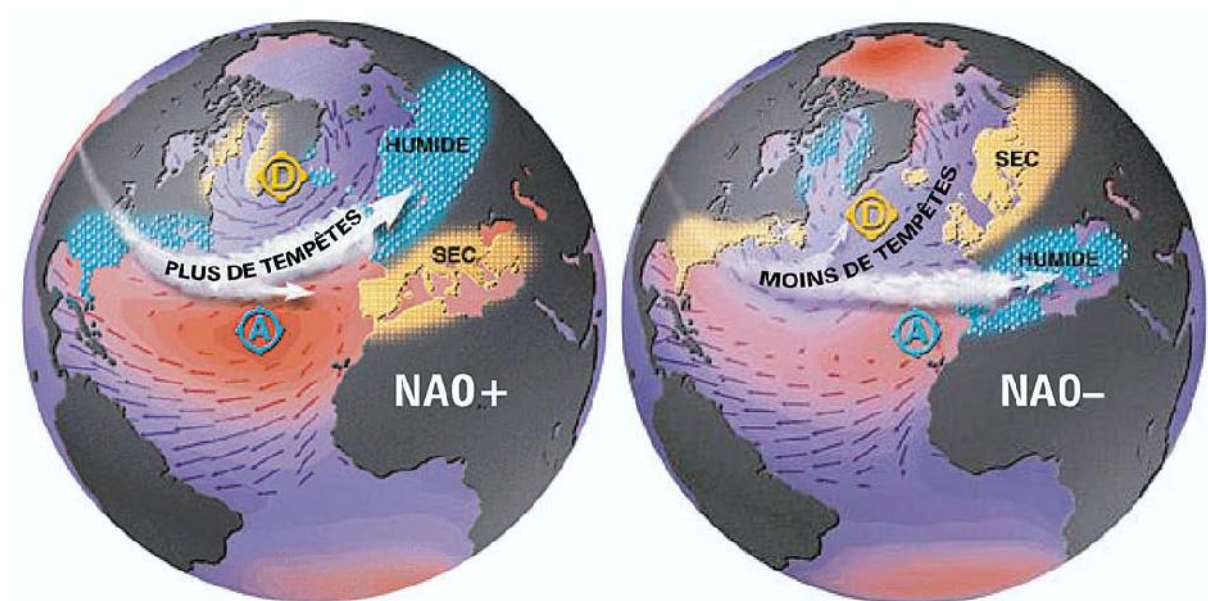


Figure 4.7 : représentation des deux cas de l'indice d'oscillation nord-atlantique ONA+ et ONA- (Source : Martin., 2004).

Il engendre des tempêtes et des précipitations fréquentes sur le nord de l'Europe et des sécheresses sur l'Afrique du nord. Quand l'indice ONA est négatif, ces effets sont inversés. Avec une différence de pression réduite entre le Portugal et l'Islande, les vents d'Ouest sont faibles et les perturbations s'engouffrent plus au sud apportant des pluies sur les régions méditerranéennes.

4.7. L'origine et la variabilité de l'oscillation nord-atlantique

Si les effets de l'oscillation nord-atlantique sont bien définis, ses causes restent plutôt obscures; les climatologues ignorent ce qui provoque le basculement. Donc comprendre l'origine de ces oscillations représente l'un des grands défis du moment.

Certains scientifiques en analysant l'évolution de l'indice ONA penchent pour des fluctuations aléatoires, d'autres distinguent une périodicité décennale de l'oscillation. Quand on observe la succession des indices ONA depuis plus d'un siècle (Figure 4.8) la vision d'une périodicité n'apparaît pas évident et l'étude statistique de cette évolution laisse place à différentes interprétations. Pour éclaircir cette question, il faut savoir si les oscillations de pression entre l'Islande et le Portugal ne répondent qu'à des variations de l'atmosphère, ou bien si l'océan y joue un rôle, et dans ce cas, le quel. Si l'ONA n'est commandée que par l'atmosphère seule, alors la succession d'une année sur l'autre est aléatoire. Car l'atmosphère n'a qu'une faible mémoire; C'est à dire l'état de l'atmosphère à un instant donnée ne dépend

pas de son état plusieurs jours ou plusieurs semaines auparavant; Les recherches et les études faites sur cet axe montrent que cet état antérieur est totalement oublié par l'atmosphère (Khaldi, 2005).

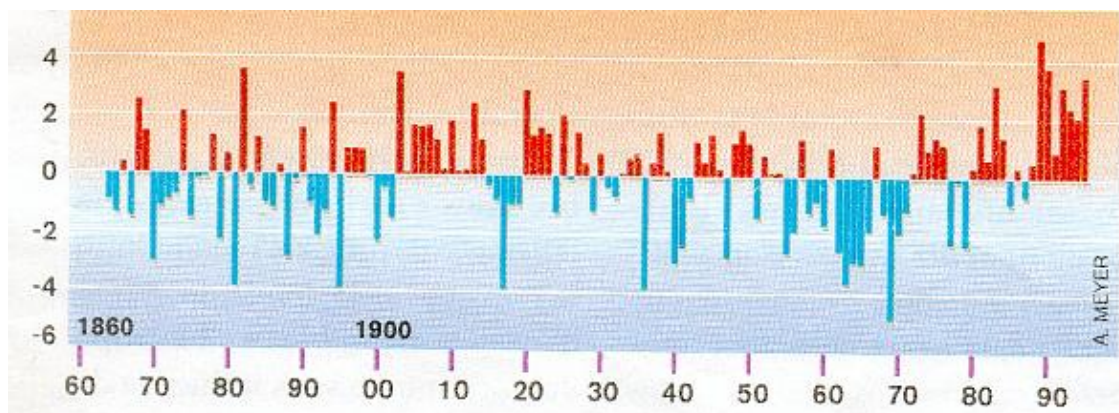


Figure 4.8: la variabilité séculaire de l'indice d'oscillation nord-atlantique (source : Heinz., 2004)

4.8. Etude de la relation entre la pluviométrie du bassin et l'indice ONA

4.8.1. Première méthode Tableau de contingence

Pour analyser la relation entre la pluviométrie et l'oscillation nord-atlantique, il faut les représenter sous forme de tableau de contingence. Cette méthode est basée sur le choix des intervalles partageant notre échantillon; donc elle présente quand même une certaine subjectivité; mais en dépit de ça l'analyse par intervalle minimise à notre avis l'effet ponctuel de la mesure que présente la corrélation simple qui relie une valeur à une autre. Les indices d'oscillation nord-atlantique standardisés par rapport à une période de 1972-2007 suivent une loi normale (Figure 4.9) et les totaux annuels des précipitations pour les stations types (Souk-Ahras, Ouenza et Tébessa) suivent aussi une loi normale (Figure 4.5).

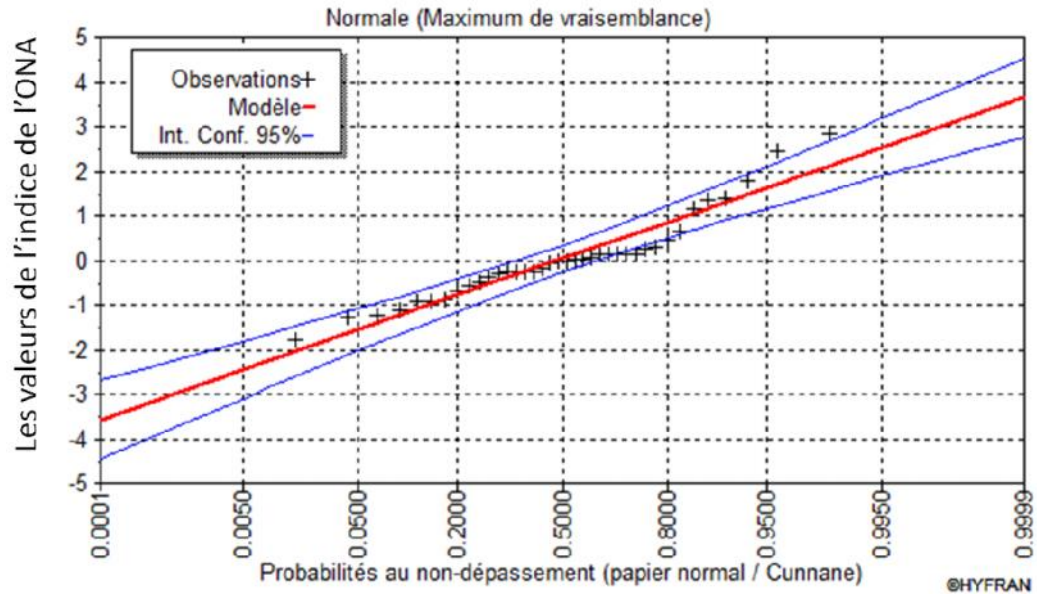


Figure 4.9 : Ajustement à une loi normale des variables centrées réduites de l'indice d'oscillation nord-atlantique.

4.8.1.1. Choix des intervalles

La détermination des seuils des intervalles dépend de la période sur laquelle la moyenne et l'écart type sont calculés. Elle est basée sur les résultats de l'ajustement par une loi normale des variables centrées réduites de l'indice d'oscillation nord-atlantique et des totaux pluviométriques. Nous avons partagé notre échantillon en 3 parties; deux intervalles d'extrémités ONA^+ et ONA^- et l'intervalle centrale ONA normale (Figures 4.10 et 4.11).

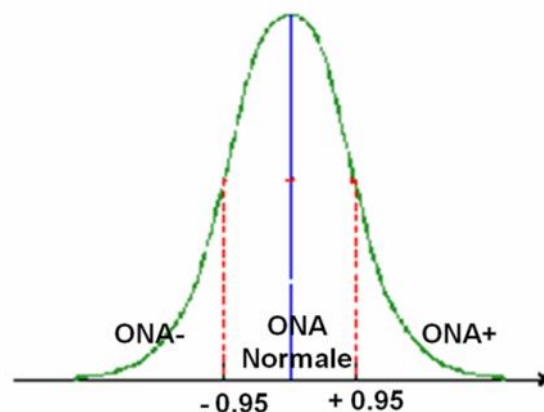


Figure 4.10: représentation des seuils de l'indice ONA.

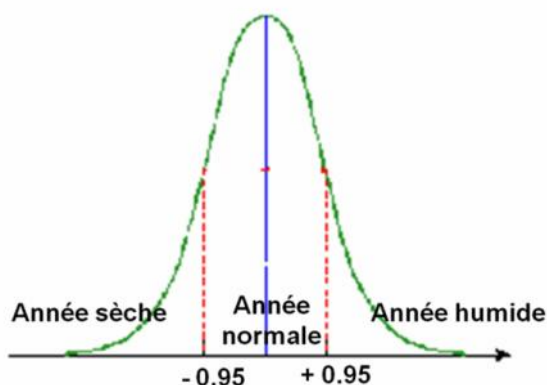


Figure 4.11: représentation des seuils de variables des totaux annuels.

Pour la pluviométrie deux intervalles d'extrémité année sèche et année humide et celle de centre année normale. Donc nous avons opté pour les seuils suivants: En se basant sur la loi normale de distribution de notre échantillon, l'indice d'oscillation nord-atlantique sera négatif s'il est inférieur à -0.95 nous avons un ONA^- ce qui impliquera d'après la recherche précédente à une année pluvieuse sur nos régions. Lorsque ces valeurs sont comprises entre -0.95 et 0.95 nous avons une année normale; par contre si elles sont supérieures à 0.95 nous avons un ONA^+ donc une année sèche. Le tableau 4.12 donne la contingence pour les trois stations types considérées précédemment sur la période 1969-2007.

Tableau 4.12 : Table de contingence entre l'indice d'oscillation nord-atlantique et les totaux annuels de la pluviométrie de la zone d'étude.

Station	Station de Souk-Ahras			Station d'Ouenza			Station de Tébessa		
Indice	Sèche	Normale	Humide	Sèche	Normale	Humide	Sèche	Normale	Humide
ONA^+	7 58.33 %	5 41%	2 16.66%	2 15%	4 36%	2 16.66%	2 15.4%	2 18%	0
ONA	5 38%	6 50%	7 58.3%	7 53%	6 54%	4 33.33%	6 46%	7 63%	7 58%
ONA^-	1 7%	2 16.66%	4 33.33%	4 30.7%	4 36%	5 41%	6 46%	3 25%	5 41%

Les résultats du tableau ci-dessus montre que, la fréquence des années sèches pendant un indice d'oscillation nord-atlantique fortement positif (ONA^+) est plus grande pour la station de Souk-Ahras où la fréquence est de 58.33 %. Pour un indice d'oscillation nord-atlantique négatif (ONA^-), il est plus probable d'avoir une année humide qu'une année sèche surtout pour les stations d'Ouenza et de Tébessa où la fréquence est de 41 %. Et le nombre des années normales pour les trois stations n'explique pas bien la relation qui existe entre l'indice d'oscillation nord-atlantique et la pluviométrie aux différentes stations. Une autre méthode basée directement sur les données observées sera analysée.

4.8.2. Deuxième méthode évolution de la fréquence des années extrêmes

Afin de déterminer dans quelle mesure l'ONA influence la pluviométrie observée sur le bassin d'étude, on utilise l'évolution de la fréquence des années extrêmes; précipitations soit supérieures ou inférieures à un quintile donné. Pour chaque année, on détermine le pourcentage des 16 stations du bassin satisfaisant aux conditions fixées, puis les résultats sont projetés sur un graphique (figure 4.12). La figure 4.12 obtenue pour la classe supérieure au troisième quintile permet d'identifier les principales phases et facilite la comparaison avec l'évolution de l'Oscillation Nord Atlantique traduite par l'indice ONA (Cassou, 2004).

Année humide ou très humide: cumul pluviométrique supérieur au troisième quintile. Indice ONA: différence entre les indices centrés réduits des valeurs mensuelles de la pression atmosphérique calculés pour une station proche de l'anticyclone des Açores et une autre proche de la dépression d'Islande. Trois périodes se distinguent sur cette figure pour les moyennes mobiles des indices ONA :

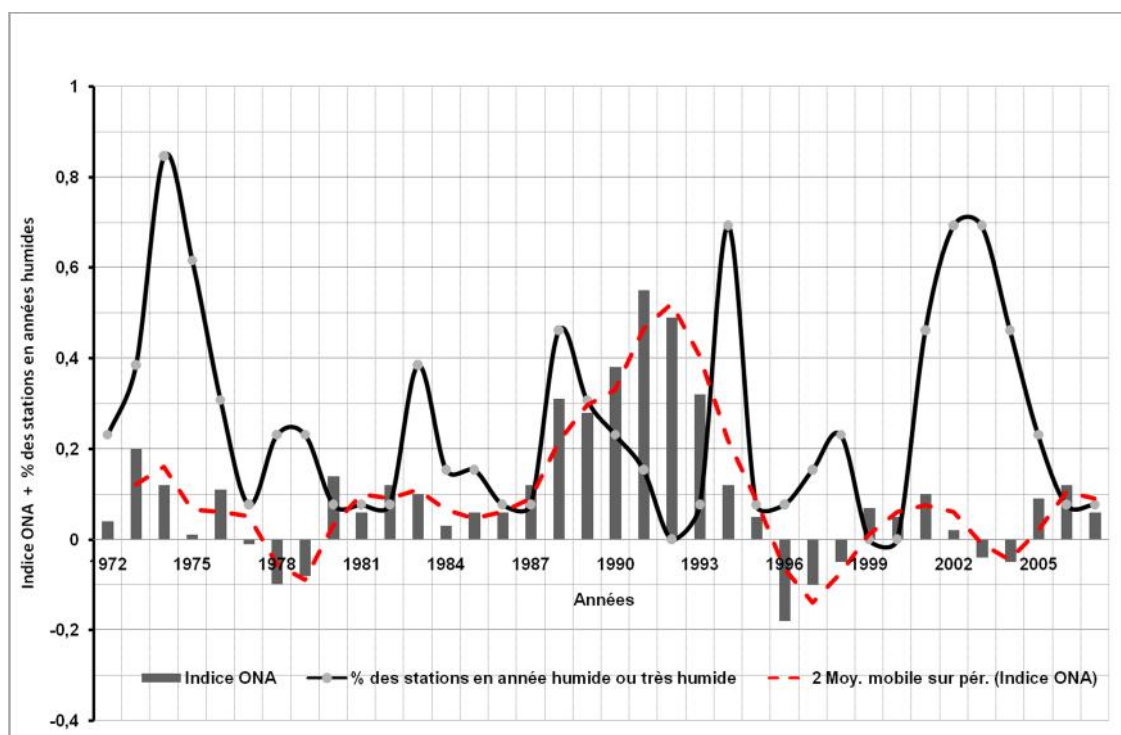


Figure 4.12: Moyennes mobiles du pourcentage annuel des 16 stations ayant connu une année humide ou très humide (courbe) et de l'indice ONA calculé de septembre à février (histogrammes) sur la période 1972-2007.

1. De 1972 à 1986, les valeurs sont faibles, inférieures à +0,5, mais elles ne descendent pas en dessous de -0,1 ;

2. De 1987-1994, les valeurs sont toutes positives, avec un maximum de +0,55 ;
3. Enfin, de 1995 à 2007, les valeurs sont particulièrement faibles, entre +0,12 et -0,18, cinq étant négatives et sept positives.

La réponse de la pluviométrie à l'Oscillation Nord Atlantique montre que la période de forte sécheresse correspond à des indices ONA positifs de forte intensité, qui témoignent d'un renforcement de l'anticyclone des Açores et d'un creusement de la dépression d'Islande. Dans ces conditions, le rail des dépressions se déporte vers les latitudes septentrionales, ce qui favorise la mise en place d'un temps sec et doux sur le pourtour du bassin méditerranéen, notamment au Maghreb. Lorsque le signal faiblit et a fortiori lorsqu'il devient négatif, la pression associée à l'anticyclone des Açores diminue tandis que la dépression d'Islande devient moins creuse. Dans ces conditions, avec une différence de pression faible, le rail des dépressions se déporte vers le sud et touche ainsi les régions de la rive sud de la Méditerranée, qui sont donc plus arrosées. Ce type de circulation caractérisé par des indices ONA élevés, exprime ses effets sur les précipitations au début et à la fin de la période d'observation à travers de forts pourcentages de stations en année humide ou très humide.

4.9. Conclusion

L'étude de la variabilité des précipitations à partir des totaux annuels, et des méthodes (quintile et analyse fréquentielle) ont été faite sur trois stations représentatives (Souk-Ahras, Ouenza et Tébessa). Cette analyse a mis en évidence la succession de deux phases déficitaires, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 80 et qui persiste dans les années 90.

Cette tendance à la baisse de la pluviométrie pour la zone d'étude durant les deux décennies 80 et 90 est principalement occasionnée par une baisse des pluies du printemps et plus particulièrement celles de l'hiver. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés En Algérie, en considérant les stations du nord, les auteurs Matari et al, (1999) 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.

Les résultats de l'étude des séquences sèches par les chaînes de Markov qu'on peut dégager à la suite de cette analyse sont que, quelles que soient les conditions de sécheresse ou d'humidité au départ :

- la probabilité d'avoir une année « sèche » est plus faible que la probabilité d'avoir une année « non sèche » ;
- Il existe une disparité nette entre les régions Nord et Sud ;
- Si une année est sèche, la probabilité d'avoir une seconde année sèche varie de 43 à 57 %. Elle est importante à l'est et au Sud (Ouenza, Tébessa) que dans la partie Nord du bassin (Souk-Ahras) ;
- En revanche, la probabilité d'avoir une année sèche après une année non sèche est faible (inférieure à 50 %) pour toute la zone d'étude ;
- Si une année est sèche, la probabilité d'avoir une année non sèche l'année suivante est importante pour l'ensemble des stations (supérieur ou égale à 50 %) ;
- Si deux années successives sont sèches, la probabilité d'avoir une troisième année sèche est faible. Elle diminue du Sud vers le Nord. Les probabilités oscillent entre 33.33 et 37.5 % ;
- Réciproquement, la probabilité d'avoir deux années sèches successives suivies d'une année « non sèche » est importante au Nord et à l'Est: elle est de 50 % à Souk-Ahras et Ouenza. Alors, au Sud est de 25 % ;
- la probabilité d'avoir deux années sèches successives faisant suite à une année « non sèche », est plus importante à l'Est qu'au Nord et au Sud: à l'Est, est de 50 %. Alors que, au Sud et au Nord, elle varie de 28.57 à 33.33 % ;
- Réciproquement, la probabilité d'avoir une année sèche isolée au milieu de deux années « non sèches » est plus importante au Sud et au Nord qu'à l'Est: elle varie de 66.66 à 71.42 % tandis que, à l'est, elle est de 33.33%.

À la lumière de nos résultats à partir du tableau de contingence et l'évolution de la fréquence des années humides et très humides, on peut dire qu'il y a un lien entre cette oscillation et la pluviométrie dans notre région d'étude. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvées sur l'Ouest Algérien et le Maroc (Dallel et Sakka., 2010 ; Lopez et al., 2011 ; Querad et al., 2011). Cette dernière oscillation cyclique, dont la portée fait encore débat, pourrait expliquer la variabilité des précipitations dans une grande partie de la zone méditerranéenne et étayer l'hypothèse de la fin des années de sécheresse dans cette zone. Mais, il faut avoir à l'esprit que la pluviométrie n'est pas expliquée uniquement par ce facteur mais elle est influencée par beaucoup de facteurs climatiques.

Chapitre 5

Caractérisation de la variabilité climatique du bassin de la Medjerda

5.1. Introduction

Depuis ces dernières décennies, les différents États accordent un intérêt croissant au changement climatique qui demeure une notion très vaste (réduction de la pluviométrie, augmentation de la température, effet de serre, ...etc).

Les différents modèles sur les changements climatiques de notre planète, prévoient ainsi une hausse probable des précipitations et des températures dans plusieurs régions du monde. Les évolutions de ces deux paramètres témoignent des bouleversements climatiques subis ces dernières années par l'Afrique du Nord et le Grand Maghreb.

Caractériser la tendance de la variabilité annuelle des précipitations est importante dans l'étude des changements climatiques. Egalement, elle est d'un apport considérable pour proposer des solutions adaptées aux projets de développement. A cet effet, il est intéressant, afin de mieux la caractériser, de chercher à situer le changement temporel de la pluviométrie constatée depuis 38 ans dans la chronologie pluviométrique de ce siècle, époque pour laquelle on dispose d'enregistrements dans le bassin versant de Medjerda. Pour déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, nous avons utilisé un certain nombre de tests statistiques sur seize stations pluviométriques possédant des séries de mesures pour une période allant de 1969 à 2007. La spatialisation des irrégularités des précipitations a été approchée par la représentation de la cartographie de l'indice pluviométrique. Des analyses statistiques et graphiques ont permis de caractériser les variations de la température de l'air de la zone d'étude. Une comparaison sur l'historique des pluies et des températures du bassin d'étude a été utilisée, afin d'analyser la tendance de l'évolution de ces variables climatiques de la période (1913-1938) à celle de la période (1969-2007).

5.2. Méthodologie

L'approche adoptée comporte les opérations suivantes:

1. détection de rupture au sein des séries pluviométriques annuelles,
2. représentation spatiale des précipitations,
3. variation de la température de l'air,
4. caractérisation de la variabilité des précipitations mensuelles et journalières par rapport aux dates de rupture.

5.2.1. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

« Rupture » doit être comprise comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu (Lubes ., 1998). L'acceptation générale, mais surtout celle des hydrologues, en ce qui concerne les totaux annuels des précipitations, est que, du point de vue stochastique, ceux-ci peuvent être considérés comme un processus stationnaire.

L'objectif de ce travail est d'entreprendre une étude statistique sur les totaux annuels de précipitations, en utilisant le test statistique de Pettitt, la statistique de Buishand et ellipse de contrôle. Ces tests sont, avec d'autres, recommandés par l'organisation mondiale de la météorologie (OMM. ,2000) pour détecter les ruptures au sein des séries temporelles. Cette démarche aidera à voir si ces ruptures dans la stationnarité sont liées seulement à des causes artificielles, ou si l'aléa climatique a un rôle prépondérant. 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 » (Lubes., 1994). Ces méthodes ne sont pas toutes adaptées à la recherche de plusieurs ruptures dans la même série.

Test de Pettitt

Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney (Pettitt., 1979).

L'absence d'une rupture dans la série (xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

Pettitt définit la variable U_t, N :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (5.1)$$

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \text{sgn}(Z)=1 \text{ si } Z>0, 0 \text{ si } Z=0 \text{ et } -1 \text{ si } Z<0 \quad (5.2)$$

Il propose de tester l'Hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$.

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

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6 k^2 / (N^3 + N^2)) \quad (5.3)$$

Pour un risque $\sim$ de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à $\sim$, l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment ^{2} où est observé K_N . Une rupture primaire se définit comme une hétérogénéité identifiée par un test de rupture à partir de la série initiale. Une rupture secondaire est une rupture obtenue à partir d'une sous série issue de la série de base.

Statistique U de Buishand (Buishand ., 1982,1984).

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

$$U = \frac{\sum_{K=1}^{N-1} (S_K^* / D_x)^2}{N(N+1)} \quad (5.4)$$

Ou:

$$S_K = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (5.5)$$

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

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser

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

Ces méthodes sont utilisées à travers le logiciel KRONOSTAT (IRD., 1998) qui permet une visualisation des résultats en format numérique mais aussi sous forme graphique.

5.2.2. Caractérisation spatiale des précipitations (Cartographie des indices pluviométriques)

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années, la méthode de l'indice pluviométrique a été appliquée. Cette méthode a pour objet, la caractérisation de la variabilité de la pluviométrie locale ou régionale, afin de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires, et la mise en place d'un système d'alerte précoce de sécheresse.

Pour chacun des postes pluviométriques retenus, un indice de la pluie interannuelle a été déterminé. Il se définit comme une variable centrée réduite (Servat et al., 1998) exprimée par l'équation 5.6:

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (5.6)$$

Avec :

X_i : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année i ;

$\bar{X}$: Valeur moyenne interannuelle de la pluviométrie sur la période étudiée;

S : Valeur interannuelle de l'écart type de la pluviométrie sur la période étudiée.

L'étude de la variation spatio-temporelle de la pluviométrie s'est faite en utilisant les différentes données des stations pluviométriques qui couvrent la zone d'étude. Les données disponibles ont été calculées et classées sur les quatre décennies (1971 - 1980 ; 1981 - 1990 ; 1991 - 2000 ; 2001 - 2007) qui couvrent la période de disponibilité des données. La base de données obtenue est exportée sous le logiciel Surfer 8.0 où il a été procédé à une interpolation de type krigeage pour générer la carte thématique.

5.2.3 Analyse de la température de l'air

La température de l'air du bassin versant du Medjerda a été analysée à partir de la statistique descriptive (valeurs moyennes) et des représentations graphiques. Cette analyse a été

effectuée à partir des données disponibles des deux stations; Souk-Ahras représentant la partie nord du bassin, et Tébessa représentant la partie sud du bassin. Et a permis de comprendre la variation saisonnière et interannuelle de la température dans le bassin de la Medjerda. En effet, ces différents paramètres influencent les précipitations dans une région donnée.

5.2.4. Caractérisation de la variabilité des précipitations mensuelles et journalières par rapport aux dates de rupture

La caractérisation des pluies mensuelles s'est limitée aux stations de Souk-Ahras, Ouenza, Boukhadra, et Tébessa, dont les séries de données sont presque complètes et la période de l'étude est commune. Pour les pluies journalières, la caractérisation s'est limitée à la station de Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza d'où nous disposons des pluies sur une période de 38 ans soit du 1er septembre 1969 au 31 août 2007. L'étude de la significativité de la variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle avant et après les années de rupture est d'interpréter la variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle à partir des années de rupture. La méthode consiste donc à mesurer les écarts entre les moyennes mensuelles des deux échantillons déterminés par la date de rupture. Quels sont les mois où les écarts sont les plus significatifs ?

L'influence de la sécheresse sur les pluies journalières a été abordée par l'étude des fractions pluviométriques journalières (Albergel.,1986, Dacosta.,1989).

La méthode consiste à répartir le total annuel en trois fractions: F1, somme des précipitations journalières comprises entre 0 et 20 mm ; F2, somme des précipitations journalières comprises entre 20 et 40 mm et F3, somme des précipitations journalières supérieures à 40 mm.

5.3. Résultats

5.3.1. Tests d'homogénéité sur les pluies annuelles

Les dates de ruptures primaires détectées (1978, 1981, 1982, 1986, 1987,1988, 1995,1996, 1999 et 2001) sont liées à des probabilités de dépassement (Tableau 5.1). Les ruptures s'observent majoritairement dans les décennies 1980 et 1990 avec un niveau de signification qui varie d'un poste à un autre. Le niveau de signification traduit l'importance réelle ou pas d'un changement de la moyenne au sein de la série pluviométrique. Les ruptures primaires très significatives (seuil d'erreur <1%), ont été détectées dans les séries pluviométriques des stations de Messloul en 1982, Ouled hamza en 1986, Boukhadra en 1987, Khemissa en 1995 et Tébessa en 1999.

Des ruptures primaires significatives ($1\% < \text{seuil d'erreur} < 5\%$) sont détectées au niveau des séries Souk-Ahras et AinSenour en 1999, AinDalia (1996), M'Daourouche (1981), El Aouinette (1999), Meskiana et Ain Dahla en 1982, Bekaria (1987), Ouenza (1988), El kouif (2001) et Ras El Aouine (1978). Des ruptures secondaires sont identifiées au niveau des stations de Tébessa (1974), El-Aouinette (1984) et Ras El- Aouine (1999), à travers l'analyse des courbes de la variable U du test de Pettitt. La figure 5.1 illustre le cas de la série de Tébessa. La rupture est ici traduite par un changement brutal dans l'allure d'évolution de la courbe. On note deux ruptures, successivement en 1974 et 1999, pour la courbe de la série de Tébessa. La rupture secondaire traduit une baisse de la pluviométrie à partir de 1974. Une tendance de reprise à la hausse de la pluviométrie est observée en 1999. La figure 5.2 présente les ellipses des quatre stations représentatives du site d'étude, station de Souk- Ahras au Nord, station de Boukhadra au Centre, et stations d'Ouled Hamza et Tébessa au Sud. L'analyse des résultats de la figure 5.2 montre que les ruptures sont observées au sein des séries avec un niveau de signification qui varie d'une série à l'autre. Sur l'ensemble de seize stations de cette étude les séries de données pluviométriques présentent des ruptures plus ou moins significatives. Ces hétérogénéités identifiées traduisent une baisse de la pluviométrie, entamée à partir des années 1970. Cette baisse de la pluviométrie a été amplifiée au cours de la décennie 1980. Une tendance de reprise à la hausse des hauteurs pluviométriques au cours de la décennie 1990 est amorcée. Ces ruptures coïncident avec les années des grandes sécheresses déterminées dans le antérieures en Algérie (Dacosta., 1989 , Djellouli., & Daget., 1993 , Talia & Meddi., 2004 , Meddi & Meddi., 2007, Meddi & Meddi., 2009 , Zeineddine., 2011) situent la plupart des ruptures à partir de 1970, et persiste dans les décennies 80 et 90.

Tableau 5.1 : Principales dates de rupture des séries pluviométriques

N°	Stations	Période d'observation	Dates de rupture
1	AinSenour	1969-2000	1999
2	Souk-Ahras	1969-2007	1999
3	AinDalia	1988-2007	1996
4	Khemissa	1971-2007	1995
5	M'Daourouche	1969-2000	1981
6	Ouenza	1969-2007	1988
7	ElAouinette	1971-2007	1999
8	Messloul	1970-2007	1982
9	Boukhadra	1969-2007	1987
10	OuledHamza	1969-2007	1986
11	Tébessa	1969-2007	1999
12	Bekaria	1971-2007	1987
13	RasElaouine	1971-2007	1978
14	Messkianna	1969-2007	1982
15	AinDahla	1969-2007	1982
16	Elkouiff	1969-2007	2001

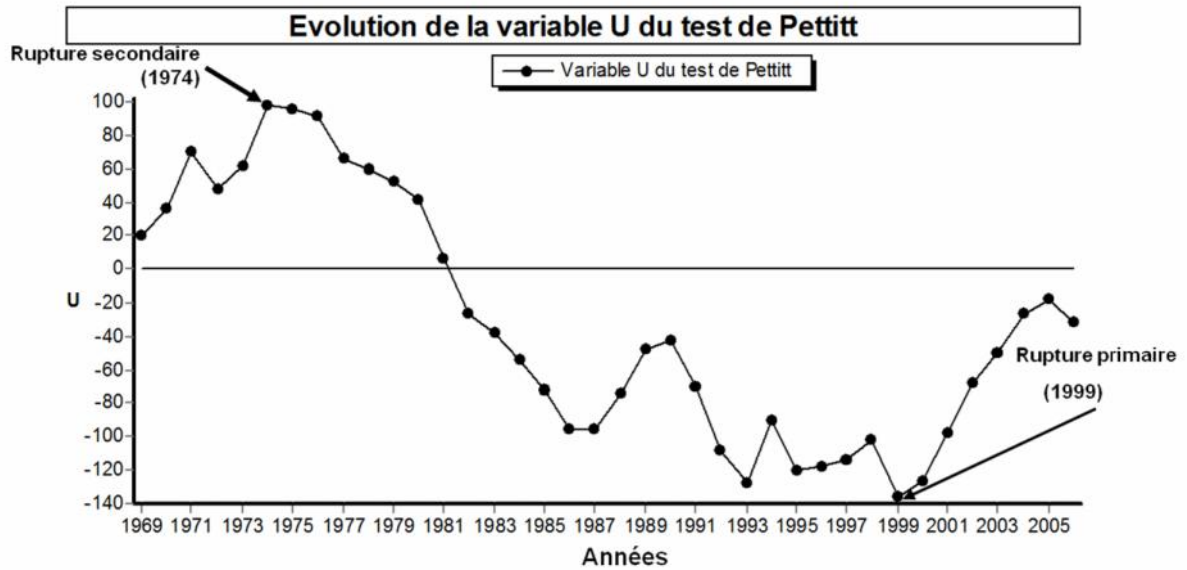


Figure 5.1: Courbe de la série pluviométrique de Tébessa (dates de rupture: 1974 et 1999)

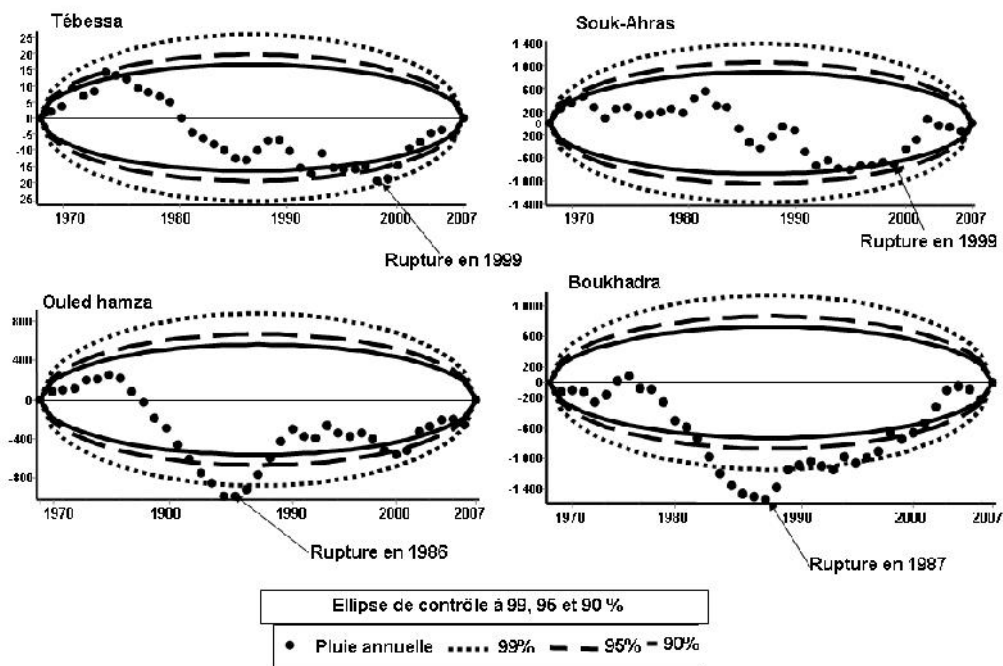


Figure 5.2: Ellipses de contrôle des pluies annuelles (1969 - 2007).

5.3.2. Variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des indices pluviométriques annuels au cours des différentes décennies, de 1971 à 2007, a permis de situer le bassin versant de la Medjerda dans son contexte local (Figure 5.3). Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin liées à la latitude et à la

longitude. La décennie 1971-1980 se distingue par une alternance de zones excédentaires et déficitaires. On observe la présence d'un caractère excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0 et 0.9 dans la partie Sud -Ouest, Sud-Est et Nord-Est du bassin d'étude. Par contre, on observe un caractère déficitaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0 et -0.7 dans la partie Nord-Ouest. Pour la décennie 1981-1990, l'apparition d'un caractère déficitaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0 et -0.5 se trouve sur la totalité du bassin. Pour la décennie 1991-2000, le caractère déficitaire s'observe sur tout le bassin mais s'accroît et apparaît très marqué dans la zone Sud-Ouest avec des indices pluviométriques compris entre -0.5 et -0.7. La dernière décennie (2001-2007) semble annoncer une tendance à un retour des précipitations, avec la réduction du champ des forts déficits. Les indices pluviométriques sont plus élevés, et oscillent entre 0.5 et 2 dans la partie Nord-Ouest, Centre et Sud-Est du bassin. La cartographie des indices pluviométriques du bassin versant de la Medjerda, a permis de mettre en évidence, la tendance générale à la baisse de la pluviométrie à partir de la décennie 1970, qui s'est aggravée au cours des décennies 80 et 90, et un retour à l'augmentation des précipitations dans la décennie 2000. Cependant, l'ensemble du bassin n'a pas été touché de la même manière, compte tenu de l'influence des climats locaux (climat sub-humide au Nord, semi-aride dans le Sud, influence des deux types de climat dans le centre du bassin). Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat du Nord-Est algérien (Mebarki., 2010, Belloum., 2009). La carte de l'A.N.R.H(1993) montre que les moyennes pluviométriques sont inférieures d'environ 10 % à celles de la série de Chaumont et Paquin (Chaumont., & Paquin., 1971). Ces deux auteurs ayant eux-mêmes constaté une diminution des précipitations par rapport à celles cartographiées par Seltzer (1946). Ces résultats sont aussi en concordance avec ceux trouvés, sur des séries moins longues, par Laborde (1993) qui indique que la baisse de la pluviométrie dans le Nord de l'Algérie, s'est installée après la décennie 70 d'une manière significative. Les tests utilisés et les résultats trouvés confirment cette tendance. Les longues sécheresses observées dans le bassin d'étude, se localisent dans les décennies 80 et 90. Ces résultats sont en conformité avec les conclusions du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat de 2001 et de 2007 (GIEC., 2007). Ainsi, qu'avec les conclusions du rapport régional des Nations unies sur le changement en Afrique du Nord. Ces périodes peuvent être utilisées, comme périodes de référence, représentant la sécheresse dans la région d'étude. Elles peuvent être utilisées dans la conception des systèmes de gestion des ressources hydriques en périodes de sécheresse.

5.3.3. Variations de la température de l'air

Les valeurs moyennes de la température de l'air, permettent de suivre l'évolution moyenne du régime thermique au niveau du bassin d'étude (Tableau 5.2). Les températures moyennes mensuelles au niveau de Souk-Ahras varient entre 24 °C, 25.43 °C (août) et 6.25 °C, 7.4 °C (janvier). Quant à celles de la station de Tébessa, elles varient entre 26.8 °C, 27.31 (août) et 6.44 °C, 6.1 °C (janvier). Les moyennes mensuelles maximales sur le bassin s'observent en général pendant le mois d'août. Les variations interannuelles de la température de l'air montrent que, cette dernière connaît une hausse régulière sur toute la période d'étude de Tébessa et de Souk-Ahras.

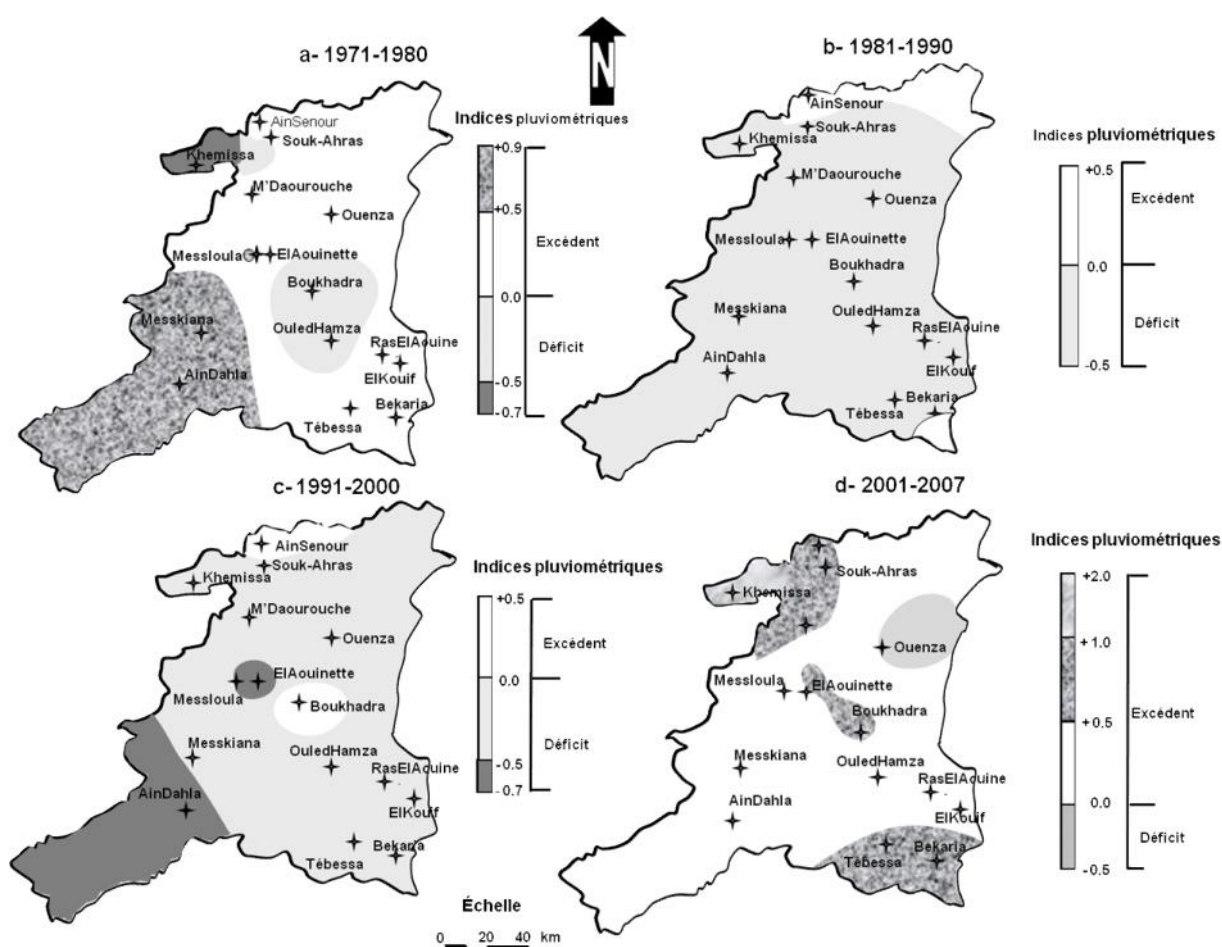


Figure 5.3: Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Medjerda (1971-2007)

Au niveau de la station de Souk-Ahras (Figure 5.4a), la température est restée inférieure à 15.5 °C avant 1976 et supérieure à 15.5 °C après 1976. De même, au niveau de Tébessa (Figure 5.4b), la température de l'air est restée inférieure à 16.24 °C avant 1987 et supérieure à 16.24 °C à partir de 1987. On constate, donc qu'il fait de plus en plus chaud sur l'ensemble du bassin. Des valeurs supérieures à la moyenne, ont été enregistrées à partir de la

décennie 1970. Cette tendance a été accentuée, à partir des années 1980 avec des températures supérieures à 16.24 °C en moyenne dans le sud du bassin, ou l'enregistre pour l'année 87-88, une température de 22.52 °C en moyenne annuelle. Ces températures ont atteint les plus fortes valeurs, au cours de la décennie 1990 et ne semblent pas régresser. Les diagrammes reliant température et pluie, ou diagrammes ombro-thermiques, aux stations de Souk-Ahras et Tébessa (Figures 5.5a et 5.5b) sur les différentes périodes, permettent d'observer, en général, de faibles valeurs de température, pendant les mois de fortes pluviométries, et de fortes valeurs pendant les mois de faibles pluviométries.

Tableau 5.2: Températures mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Tébessa	1913-1938	6.1	7.5	10.4	14.05	18.3	23.45	26.8	26.25	22.65	16.55	11.35	7.25	15.89
	1978-2007	6.44	7.59	11.31	14.57	19.48	23.97	27.31	26.62	21.95	18.27	10.43	6.90	16.24
Souk-Ahras	1913-1938	6.25	7.25	9.3	12.65	15.95	20.5	23.9	24	21	15.85	11.2	7.3	14.60
	1969-2007	7.4	8.02	10.02	12.34	17.02	21.8	25.27	25.43	21.43	17.01	11.73	8.26	15.49

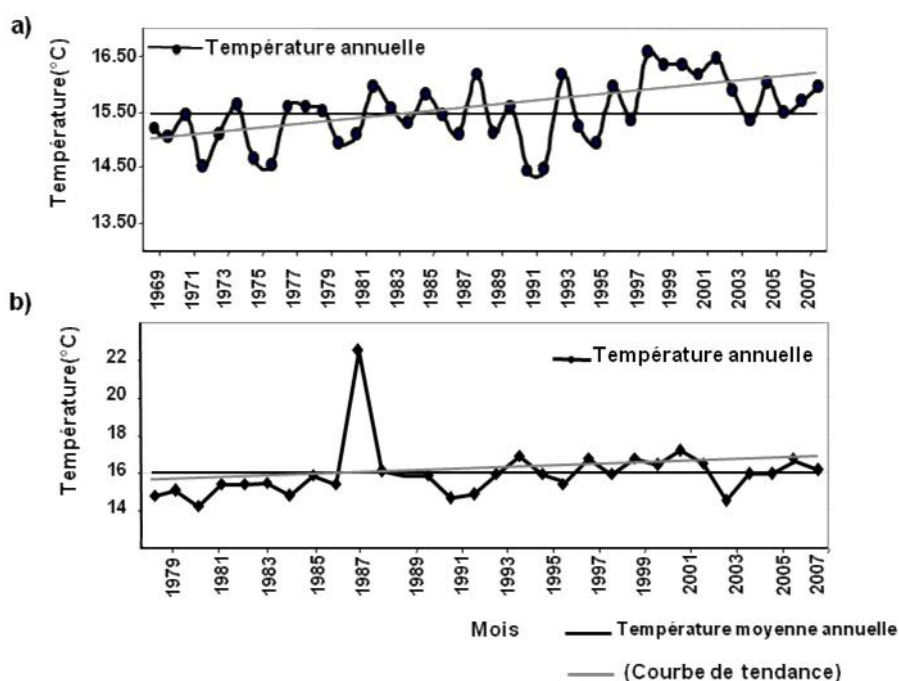


Figure 5.4 : Variations interannuelles de la température de l'air : a- à Souk-Ahras (1969-2007) ; b- à Tébessa (1978-2007).

Le tableau 5.2 montre que, les températures moyennes mensuelles observées pour la deuxième période des deux stations sont supérieures à celles de la période (1913-1938). Le réchauffement à été de l'ordre 0.89 °C à Souk-Ahras et de 0.35 °C à Tébessa. Cet accroissement de température participe au changement climatique local et global, et s'accorde avec les observations faites par ailleurs sur l'augmentation des températures au cours des dernières décennies en Algérie.

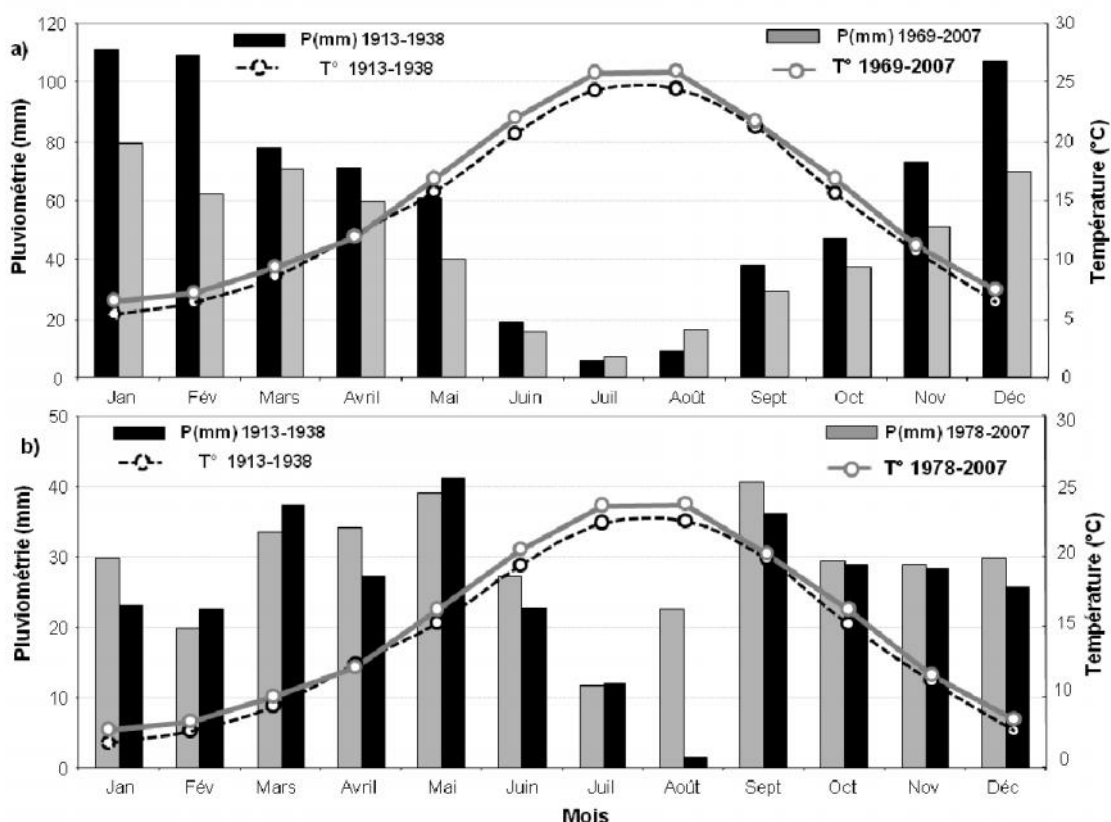


Figure 5.5 : Diagrammes Ombro-thermiques: a- à Souk-Ahras; b- à Tébessa.

5.3.4. Variation des pluies mensuelles

Pour placer la variation des pluies mensuelles du bassin d'étude dans son contexte historique, une analyse a été réalisée sur la période 1913-1938, à partir des séries de données les plus longues et disponibles des deux stations de Souk-Ahras et Tébessa (Tableau 5.3). Les pluies moyennes mensuelles, observées pendant la période (1969-2007) à la station de Souk-Ahras sont inférieures à celles de la période (1913-1938) soit une diminution au total de l'ordre de 26 % accompagnées d'une augmentation des pluies estivales de l'ordre de 54 %. Cependant, pour

la station de Tébessa la deuxième période (1969-2007), s'est révélée excédentaire à celle de la période (1913-1938) soit une augmentation au total de 17 % (avec une augmentation très marquée de l'ordre de 78 % pour la saison estivale), cette augmentation peut expliquer la forte variabilité dans le caractère orageux. En revanche, les résultats de la figure 5.6 des quatre stations principales, dont les chroniques sont les plus complètes mettent en évidence les excédents des pluies mensuelles après les dates de rupture des décennies 80 et 90. Un déficit pluviométrique mensuel est observé au mois de mars pour l'ensemble de ces stations.

Tableau 5.3: Pluies moyennes mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa (1913-1938 et 1969-2007)

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Tébessa	1913-1938	23.00	22.60	37.40	27.08	41.20	22.83	11.97	1.60	36.15	29.02	28.18	25.72	25.56
	1969-2007	30.30	25.33	40.90	35.07	37.70	27.75	13.44	23.70	37.62	30.64	30.21	28.39	30.09
Souk-Ahras	1913-1938	111	109	78	71	61	19	6	9	38	47	73	107	60.75
	1969-2007	79.45	61.89	70.38	59.56	40.28	15.87	7.14	16.11	29.27	37.62	50.93	69.67	44.85

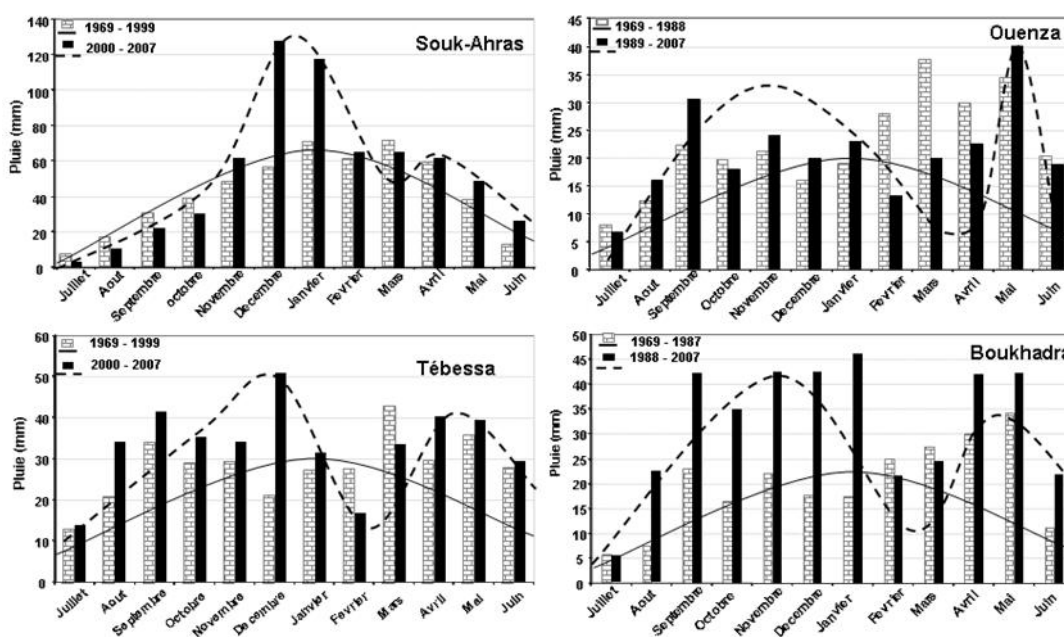


Figure 5.6: Précipitations mensuelles moyennes avant et après rupture aux stations de Souk-Ahras, Ouenza, Boukhadra et Tébessa.

Si l'on examine les diminutions relatives des précipitations avant la rupture de stationnarité de la fin des années 80 ou des années 90, la diminution des pluies moyennes mensuelles est de l'ordre de 15 % et 24.5 % pour la station de Tébessa et Souk-Ahras respectivement avant 1999, 64 % et 6 % pour la station de Boukhadra et Ouenza avant 1987 et 1988. On notera, cependant que, ce bassin connaît une diminution pluviométrique mensuelle avant les dates des

ruptures, et une tendance à la hausse après ces dates. L'ensemble de ce bassin a été touché par une irrégularité pluviométrique mensuelle temporelle sur la totalité des mois durant ces dernières décennies.

5.3.5. Les années de rupture marque le début d'hivers et la fin du printemps particulièrement pluvieux et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août

5.3.5. 1. Les excédents de décembre, janvier

Sur les quatre stations représentant le site d'étude, la moyenne des mois de décembre, janvier et novembre calculée sur la période après rupture est largement supérieure à la moyenne de la période précédente. Les écarts sont très marqués respectivement, en particulier à Souk-Ahras et Boukhadra rapport de 2.27 et 2.46 au mois de décembre, rapport de 1.65 et 2.50 au mois de janvier et au mois de novembre 1.27, 2.09. Ces résultats sont à nuancer car ils peuvent être la conséquence des précipitations remarquables concentrées en une seule année. Le mois décembre 2002 fut le plus pluvieux depuis 1969 sur le bassin versant d'étude (256.5 mm à Souk-Ahras, 148.6 mm à Tébessa et 81 mm à Ouenza).

5.3.5. 2. Les excédents d'avril, mai et juin

Comme pour le mois décembre, les ruptures de 1999 et 1987 par exemple font ressortir le mois d'avril comme particulièrement pluvieux sur la période 1999 - 2007 et 1988 - 2007 par rapport à la période précédente. A l'exception de la station d'Ouenza, l'ensemble des trois postes retenus on observe des écarts positifs. Les stations de Tébessa, de Boukhadra et de Souk-Ahras montrent des écarts très importants respectivement 1.36, 1.27 et 1.05. Le mois de mai enregistre certaines valeurs exceptionnelles durant la dernière décennie: 108 mm à Souk-Ahras en 2002; 72.7 mm à Tébessa en 2007; 91.9 mm à Ouenza en 2005; 82 mm à Boukhadra en 2005, ces valeurs sont très supérieures à la normale. Le mois de juin aussi enregistre certaines valeurs exceptionnelles durant la dernière décennie: 82.2 mm à Souk-Ahras en 2000; 82.2 mm à Tébessa en 2003; 64.1 mm à Ouenza en 2003; 88.2 mm à Boukhadra en 2000, ces valeurs sont très supérieures à la normale. Des pluies excédentaires, localisées dans la dernière décennie 2000, sont remarquées.

5.3.5. 3. Une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août

En été, dans la région d'étude, de gros orages présentant de fortes intensités durant une période n'excédant pas les 30 minutes sont observées. Le mois d'août présente des excédents significatifs depuis 1970 confirmés par les postes témoins. Il convient de s'interroger sur les

caractères de ce mois durant la dernière décennie. Les précipitations d'août, sont souvent associées aux catastrophes pluvieuses dans le Nord et le Sud du bassin. Il y a effectivement une concentration de ces pluies exceptionnelles (supérieures à 30 mm en 24 heures). Toutefois, il est difficile d'interpréter la variabilité de ces phénomènes très ponctuels. Depuis 1969, on dénombre 10 et 9 épisodes sur l'ensemble du Sud et le Nord du bassin, dont 6 et 4 enregistrées respectivement dans la décennie 80 et 90. Le bassin versant de Medjerda a enregistré durant cette période d'étude 136.7 mm à Souk-Ahras, 93 mm à Tébessa, 49 mm à Ouenza, 50.1 mm Boukhadra. Cet événement a eu lieu le 22 Août 2002 et a produit des inondations, dégâts matériels importants et la mort de 3 personnes. Ces pluies sont caractérisées par d'importantes précipitations en peu de temps. Elles sont très irrégulières d'une année à l'autre et leur période de retour est difficile à calculer.

5.3.5. 4. Les déficits du mois de mars

La moyenne du mois de mars après rupture est inférieure à celle de la précédente. Les écarts sont marqués à Ouenza où le rapport est de 0,5 entre les deux périodes. Ils sont tout aussi importants à Tébessa (0,79), à Boukhadra (0,89) et à Souk-Ahras (0,9). A Souk-Ahras, la normale climatique (1969 - 1990) est de 100 mm au mois de mars. Depuis 1990, seul le mois de mars 2004 a été supérieur à la normale, les autres années, il a été observé des cumuls inférieurs à 50 mm et parfois même égale à 3 mm pour les mois de mars 1992 et 1997. Le mois de mars en 1992 a été le plus sec du bassin versant de la Medjerda sur la période d'étude; 3.3 mm à Souk-Ahras, 7.1 mm à Tébessa, 4.5 mm à Ouenza et 2 mm à Boukhadra. D'après une étude sur le sud du bassin méditerranéen, le mois de mars accuse un sérieux déficit depuis le début des années 1990, avec des conséquences parfois désastreuses (Blöchliger & Neidhöfer., 1998).

5.3.6. Variation des fractions pluviométriques

L'étude des précipitations annuelles et mensuelles a clairement montré la variabilité temporelle des totaux annuels et mensuels durant la période d'étude, sans toutefois, décrire le phénomène en recherchant quels sont les paramètres qui ont varié de façon significative. Il a été dégagé l'influence de la sécheresse sur les pluies journalières par l'étude des fractions pluviométriques journalières. L'analyse des résultats obtenus (Tableau 5.4) montre qu'elles évoluent de façon indépendante. F1 varie avec des coefficients de variations compris entre 0,31 et 0,34 et F2 varie avec des coefficients de variations compris entre 0,66 et 1.10. Par contre F3 varie avec des coefficients de variation très élevée. Ainsi, une tendance à la hausse

du cumul des pluies supérieures à 20 mm (qui sont considérées comme les fortes pluies) semble se dessiner à partir des années de rupture pour les trois stations, dont les chroniques journalières sont disponibles (figures 5.7 et 5.8). Ces différents résultats ont permis d'avoir le comportement temporel des fractions pluviométriques qui constituent un facteur dans la tendance d'explication de la variabilité pluviométrique. Cette forte variabilité peut expliquer l'irrégularité des pluies et leurs caractères orageux. Cette nouvelle phase pluvieuse coïncide avec une recrudescence dans le pays de catastrophes de type inondations urbaines. Ces épisodes pluvio-orageux ont généré à plusieurs reprises, des graves inondations meurtrières. L'épisode le plus tragique est sans nul doute celui qu'a connu en 2001 le quartier d'Alger « Bab – El Oued » (la crue subite de l'Oued Koriche a fait plus de 800 morts) (Benazzouz., 2011).

Tableau 5.4 : Différentes fractions pluviométriques journalières des trois stations dont les chroniques sont disponibles									
	Période 1969-2007			Période avant rupture			Période après rupture		
	0-20	20-40	> 40	0-20	20-40	> 40	0-20	20-40	> 40
Souk-Ahras									
Moyenne	381.48	82.77	52.03	365.62	82.29	42.87	440.95	84.55	86.36
Ecart type	118.55	54.24	53.06	116.44	57.50	46.90	114.01	42.94	63.75
Coeff. variation	0.31	0.66	1.02	0.32	0.70	1.09	0.26	0.51	0.74
Tébessa									
Moyenne	264.04	50.73	33.31	249.34	47.59	36.15	319.19	62.51	22.68
Ecart type	94.75	38.90	48.00	94.52	39.91	48.54	77.73	34.63	47.49
Coeff. variation	0.36	0.77	1.44	0.38	0.84	1.34	0.24	0.55	2.09
Ouenza									
Moyenne	180.27	58.52	20.32	198.51	54.14	13.13	162.03	62.90	27.51
Ecart type	60.66	64.51	39.13	63.60	41.43	22.69	53.08	82.45	50.23
Coeff. variation	0.34	1.10	1.93	0.32	0.77	1.73	0.33	1.31	1.83

Pluies diluviennes en août 2002 (Souk-Ahras et Tébessa) 3 décès durant l'évènement, et dégâts matériels importants. En 2008, les pluies diluviennes qu'a connue la région du M'Zab ont provoqué la crue de l'oued M'Zab et la submersion de la ville de Ghardaïa, là encore, les victimes se comptent par dizaines. Plusieurs autres villes algériennes ont enregistré ces dernières années une recrudescence de ce type de phénomène. Les pluies tant attendues après ces deux décennies de sécheresse sont ainsi de plus en plus redoutées par les populations locales. Cette augmentation des fréquences des catastrophes de type inondation confirme que les cycles pluviométriques en Algérie se caractérisent désormais par des pluies plus intenses (Zeineddine et al., 2013, Saadaoui & Ben Sakka., 2007). De multiples interrogations,

peuvent être formulées quant aux causes et aux conséquences, voir même à l'existence d'une variabilité de la pluviométrie au cours de ces dernières décennies en Algérie.

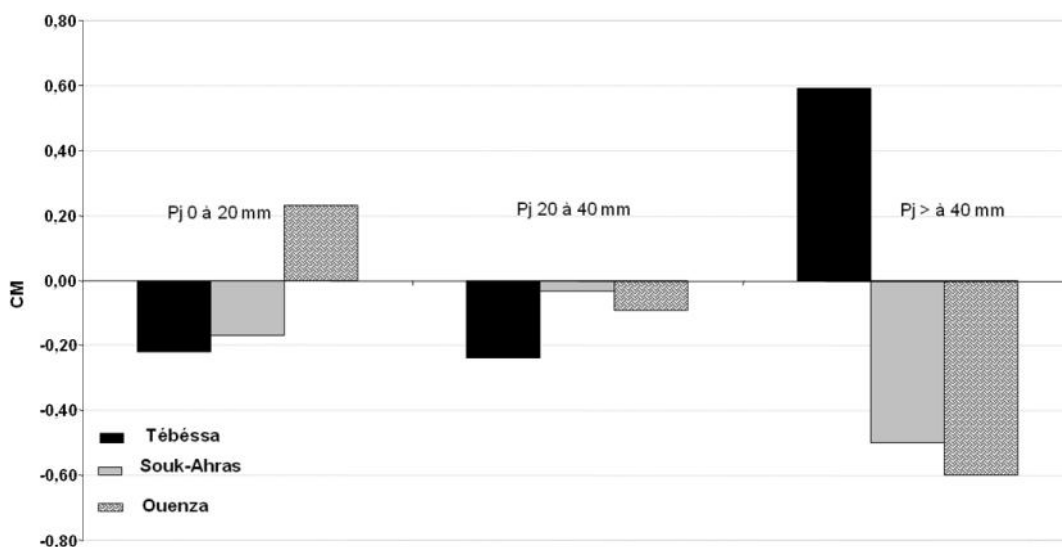


Figure 5.7: Changements de moyenne (CM) pour différentes fractions pluviométriques avant et après la rupture (Pj : précipitations journalières (< 20 mm, 20 à 40 mm, > 40 mm).

CM = rapport moins un entre la valeur annuelle moyenne sur la période après rupture et celle sur la période avant rupture.

Elles ont augmenté de façon importante mais tout aussi irrégulière et s'étalent sur un petit nombre de jours depuis le début des années 1990 (Zeineddine., 2011). De nombreux travaux sont effectués sur la corrélation entre la variabilité des précipitations et l'élévation de la température (OMM., 2001, GIEC., 2007), la période 1990-2000 est considérée comme la plus chaude du XX^{ème} siècle. Et la moyenne décennale des températures (2001 – 2010) représente la moyenne la plus élevée depuis le début des relevés des instruments météorologiques (OMM., 2001). Parallèlement à cette hausse, une augmentation probable des précipitations (GIEC., 2007) est attendue. Coïncidence ou corrélation avec les résultats trouvés ci-dessus dans la zone d'étude. Il apparaît que la température est un facteur de l'irrégularité de la variabilité temporelle des régimes pluviométriques saisonniers dans le bassin d'étude. En effet, ce paramètre atmosphérique influence fortement la variabilité temporelle des variables pluviométriques. Or, les résultats précédents de l'étude montrent une baisse des variables pluviométriques dans les décennies 80 et 90, et une reprise pluviométrique après les dates de ruptures de ces décennies, ainsi qu'une hausse des températures au cours des dernières décennies est observée dans le bassin versant de Medjerda.

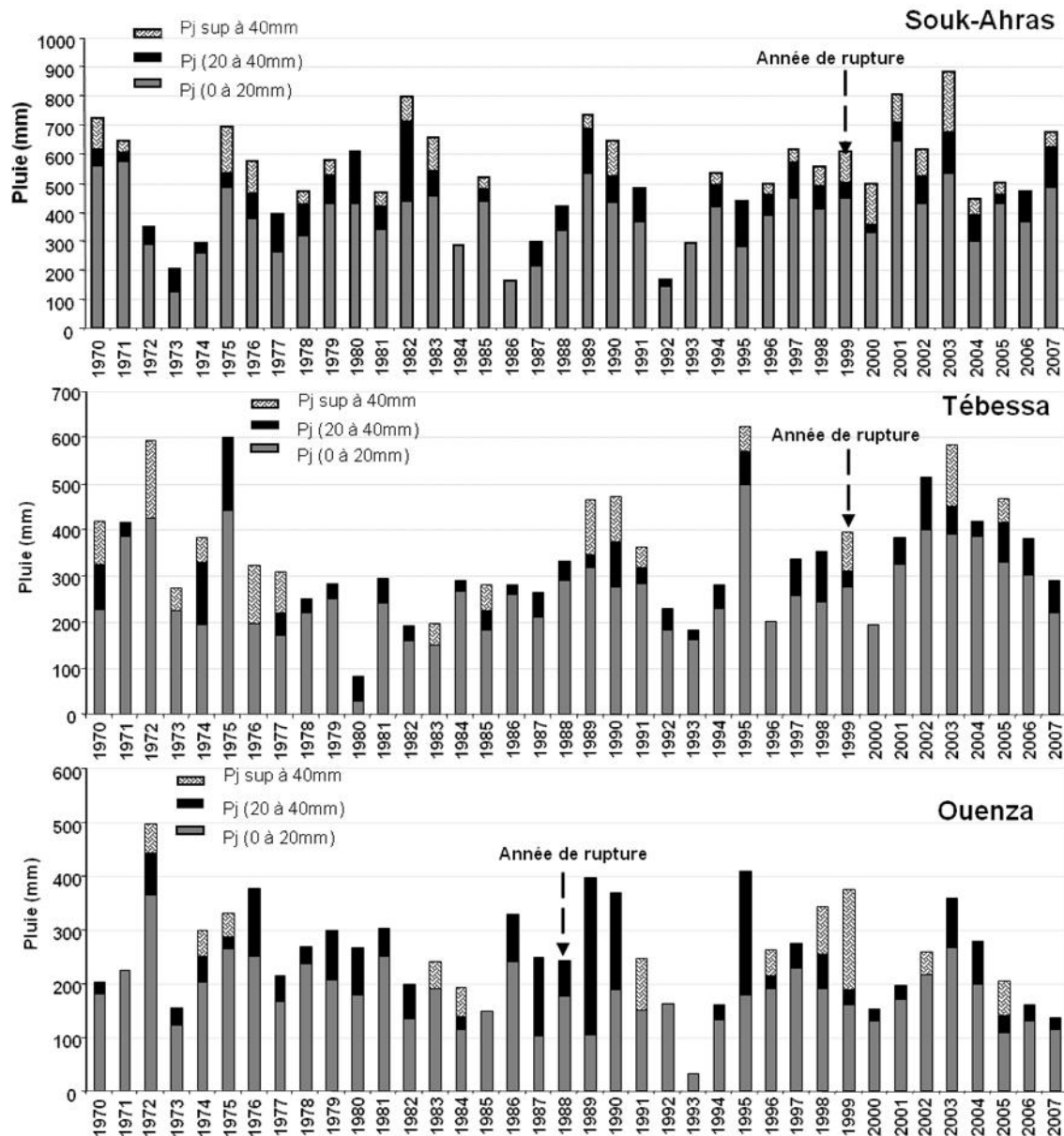


Figure 5.8: Valeurs annuelles de différentes fractions pluviométriques (précipitations journalières < 20 mm, de 20 à 40 mm et > 40 mm).

Partant de ces constats, on peut dire que la variabilité des régimes pluviométriques saisonniers dépend d'une part, de la hausse de la température de l'air et d'autre part, elle coïncide avec des changements importants qui influent sur le climat local, à savoir :

- le taux d'urbanisation relativement faible du bassin d'étude qui était entouré de chaînes de forêts importantes pendant les années 60 a connu pendant les années 70 une croissance accélérée de la population causant une déforestation rapide.
- les activités industrielles dans la région Nord et Sud du bassin d'étude.

- La construction des barrages Ain Dalia et Oued Charef mises en service en 1987 dans du bassin d'étude.

Le changement du climat local peut trouver sa source dans la déforestation, l'urbanisation, les activités industrielles et la construction de deux barrages. Ces surfaces d'eau n'altèrent pas les grands mécanismes de précipitation dans la région, mais elles peuvent être derrière les pluies de type convectif d'été de plus en plus fréquentes et intenses dans cette région. Dans tous les cas elles ne peuvent pas expliquer à elles seuls ces changements.

5.4. Conclusion

L'analyse des séries pluviométriques de la période d'étude 1969-2007 de la zone d'étude montre que les chroniques ne sont pas stationnaires, et qu'elles ont subi une rupture dont la date est comprise entre 1978 (Ras-ElAouine) à 2001 (ElKouif). Sur l'ensemble des tests de détection de rupture, des ruptures sont identifiées autour de la décennie 1980 (1981, 1982, 1986, 1987, 1988) et de la décennie 1990 (1995, 1996, 1999). On remarque que la majorité des ruptures se localisent dans les décennies 80 et 90. À l'échelle mensuelle, en analysant les stations dont les chroniques sont les plus complètes (Souk-Ahras, Tébessa, Ouenza et Boukhadra), on constate une très grande irrégularité mensuelle après les dates de rupture des décennies 80 et 90. On observe une augmentation des pluies du début d'hiver et du printemps avec un déficit du mois de mars et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août.

L'influence de la sécheresse sur les pluies journalières se trouve mise en évidence par l'étude des fractions pluviométriques des trois principales stations. Une tendance à la hausse du cumul de pluies supérieures à 20 mm (considérées comme les fortes pluies) se dessine à partir des années de rupture. Aux variations temporelles, s'ajoutent les variations spatiales des précipitations. Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin. La décennie 1971-1980 se distingue par une alternance de zones excédentaires et déficitaires. Les décennies 1981-1990 et 1991-2000 apparaissent comme déficitaires. La dernière décennie (2001-2007) apparaît comme excédentaire. Le bassin connaît une diminution pluviométrique au total avec une augmentation des pluies estivales, et une hausse régulière des variations interannuelles de la température de l'air pourrait être derrière la prédominance des ces orages sur ces dernières décennies, mais elle ne peut pas expliquer à elle seule ce changement.

Ces résultats corroborent avec celles de l'étude (Zeineddine., 2011) qui affirme que les longues sécheresses observées dans les années quatre- vingt et quatre-vingt-dix, et qui confirme le retour de pluie durant les dernières années de la série (2002 - 2006). Les observations faites en (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012) confirment aussi la prédominance de conditions plus humides, puisque le ministère de l'agriculture algérien a annoncé pour l'année 2010, une production céréalière record de 62 millions de quintaux, un chiffre jamais atteint par l'agriculture algérienne. Les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état aussi d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % sur ces dernières années. Parallèlement à cette tendance, on note aussi une nette recrudescence des pluies orageuses dans presque la totalité des stations. Les pluies qui s'abattent sur le territoire algérien sont ainsi devenues plus intenses, cet argument est d'ailleurs conforté par une augmentation sans précédent des inondations et des crues dévastatrices dans le pays (Zeineddine., 2011, Benazzouz., 2011).

Cependant, la période récente 2007-2013 n'étant pas prise en compte dans cette étude, il serait intéressant d'intégrer cette période dans des recherches futures, afin de déterminer si cette tendance à la hausse des températures et des précipitations constatée se poursuit dans la zone d'étude.

Chapitre 6

Évolution du régime hydrologique et détection de rupture

6.1. Introduction

Les précipitations connaissent en effet de fortes fluctuations qui se traduisent par l'existence d'années sèches et d'années humides, des séquences exceptionnellement sèches, ou très humides. Les conséquences d'une telle variabilité se marquent dans l'abondance annuelle, dans les régimes fluviaux saisonniers et dans les formes extrêmes de l'écoulement (crues et étiages). L'étude des séries hydrométriques menées sur une période de temps assez longue permet d'évaluer la sensibilité des rivières aux variations du climat. A cet égard, nous proposons la présente étude en vue de déterminer l'influence de ces aléas sur les ressources en eau superficielles.

6.2. Analyse des écoulements

6.2.1. Ressources annuelles en eau de surface disponibles

L'apport annuel moyen des bassins versants, selon la série étudiée est donné au Tableau 6.1.

Tableau 6.1: Evaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes			
Stations	Apport moyen (. 10^6 m^3)	Apports extrêmes (. 10^6 m^3)	
		Minimum	Maximum
Souk-Ahras	36.67	6.35	119.57
AinZerga	3.29	0.39	18.24
ElAouinette	38.82	15.35	82.76
Ouenza	85.67	0.09	311.97
Morsette	7.70	0.10	23.13

L'apport annuel moyen n'a, cependant qu'une signification théorique en raison de la forte variabilité inter annuelle de l'écoulement superficiel mise en lumière par les valeurs de l'hydraulicité.

6.2.2. Ajustement statistique

En général pour un climat méditerranéen, les apports à l'échelle annuelle ainsi qu'à l'échelle mensuelle ne suivent pas une loi normale, le plus souvent, on essaie d'ajuster les apports à une loi log – normale qui a la particularité d'être dissymétrique. La loi log- normale est préconisée par certains hydrologues qui la justifient en argumentant que, l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. En effet, le produit de r variables se ramène à la somme de r logarithmes de celle- ci. L'examen graphique de ces séries a confirmé l'ajustement de la loi citée précédemment aux séries des apports annuels (Figures 6.1a et 6.1b).

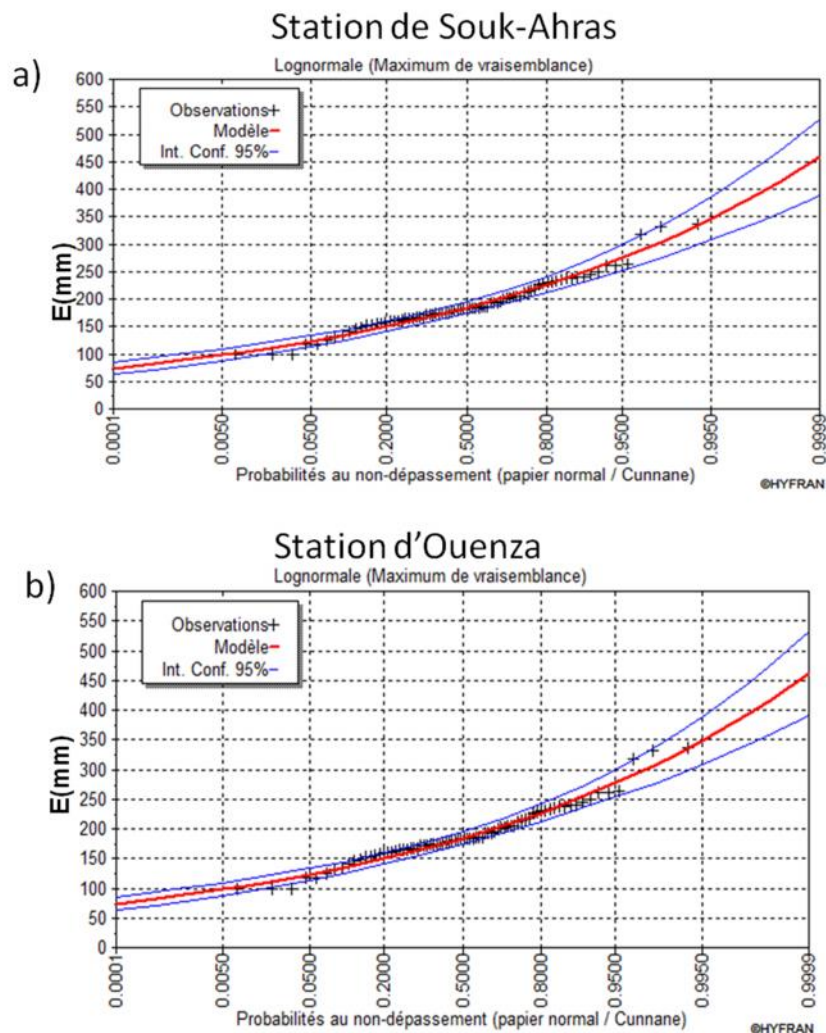


Figure 6.1: Ajustement à la loi log-normale des lames d'eau écoulées annuelles : a) à Souk-Ahras ; b) à Ouenza.

L'étude statistique des apports présente un intérêt indéniable dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques et permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité de l'écoulement annuel.

6.3. Analyse de la variabilité temporelle des écoulements

En Algérie du Nord, un déficit significatif de l'écoulement de certains cours d'eau a été observé. La conséquence d'un tel déficit des ressources en eau superficielles peut endommager l'équilibre environnemental et par conséquent nuire aux différentes activités humaines qui sont directement ou indirectement liées à l'utilisation de ces ressources.

6.3.1. L'écoulement annuel

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans les différents bassins d'étude, nous utiliserons les modules spécifiques, car ces derniers permettent de les comparer entre eux en ramenant le débit à l'unité de surface. L'abondance spécifique des bassins (Tableau 6.2) varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique. Le bassin versant de l'Oued de Medjerda, s'étend sur 217 km², il reçoit plus de précipitations. Son débit spécifique est de 5.88 l/s/km² correspondant à une lame d'eau moyenne écoulée de 185.37 mm. Le bassin versant de l'oued Mellegue (4575 km²), reçoit moins de précipitations. Son débit spécifique est de 0.63 l/s/km², soit une lame moyenne d'eau écoulée de 19.81 mm. Quant, à (oued chabro) et l'oued Zergua, leurs débits spécifiques sont respectivement de 0.187 et 2.13 l/s/km² équivalents à une lame d'eau moyenne écoulée de 5.90 et 67.18 mm. Les valeurs du débit spécifique au niveau de deux bassins oued Medjerda et oued Zergua sont relativement importantes, c'est dû à la taille et la lithologie des bassins.

Le coefficient de variation varie entre 1.17 et 0.51 pour le bassin versant d'El-ksob et Méllègue respectivement. Ceci met en évidence l'irrégularité de l'écoulement et la forte dispersion autour de la moyenne des séries chronologiques des débits moyens annuels.

- Les années correspondants au débit moyen annuel minimum sont pratiquement les mêmes pour l'ensemble des stations étudiées (les années 80 et 90).
- Concernant le débit moyen annuel maximum, nous avons distingué deux périodes:

1. les années 90 pour Méllègue et El-ksob et ;

2. début des années 2000 pour Medjerda et les autres stations.

Tableau 6.2 : Caractéristiques hydrologiques des stations retenues.

Rivière	Station	Q moyen interannuel (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	Lame d'eau moyenne interannuelle écoulée: La (mm)	CV	La max moyenne annuelle (mm)	Année	La min moyenne annuelle (mm)	Année
O.Medjerdah	Souk – Ahras + Ain-Dalia	1.19	5.88	185.37	0.76	555.29	2003-2004	29.22	1985-1986
O.Mellegue amont	Ouenza	2.87	0.63	19.81	0.69	68.19	1994-1995	0.02	1981-1982
O.Mellegue amont	El - Aouinette	1.23	0.35	10.98	0.51	23.41	1975-1976	4.34	1972-1973
O.Zerga	Ain- Zarga	0.104	2.13	67.18	1.02	372.32	2002-2003	7.96	1984-1985
Oued El-Ksob	El- Azreg	0.35	0.74	20.24	1.17	92.82	1998-1999	0.95	1991-1992
O.Chabro	Morsott	0.244	0.187	05.90	0.77	17.73	2000-2001	0.08	1992-1993

Les figures 6.2, 6.3, 6.4 permettent la visualisation graphique des éventuelles ruptures dans les séries hydrométriques du bassin d'étude.

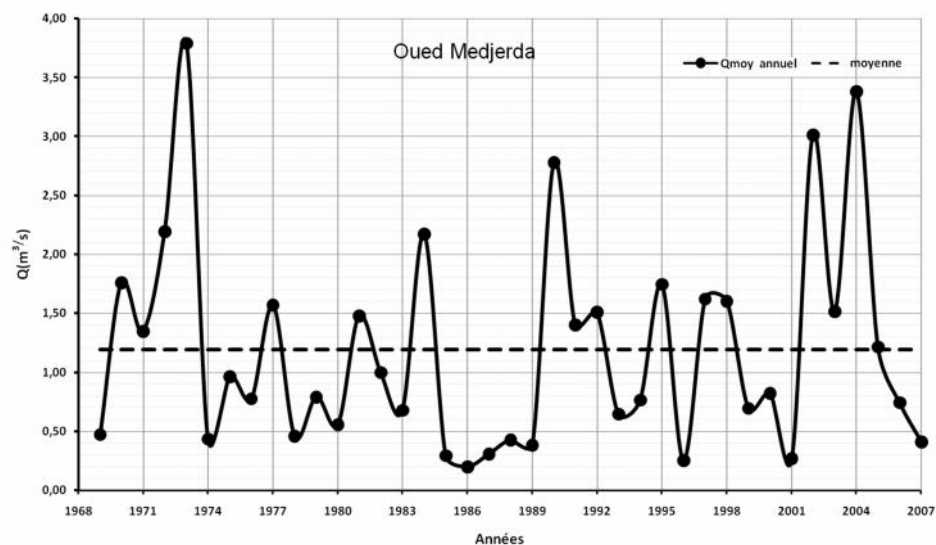


Figure 6.2 : Variation du débit moyen annuel à la station de Souk-Ahras.

En se basant sur ces figures, il apparaît que, durant la période de 1974 à 1999, la majorité des débits moyens annuels sont inférieurs à la moyenne au niveau de l'oued Medjerda, et de (1972-1998) à Ouenza ainsi que de (1973-1997) à Morsette. Des observations similaires sont enregistrées dans les autres stations.

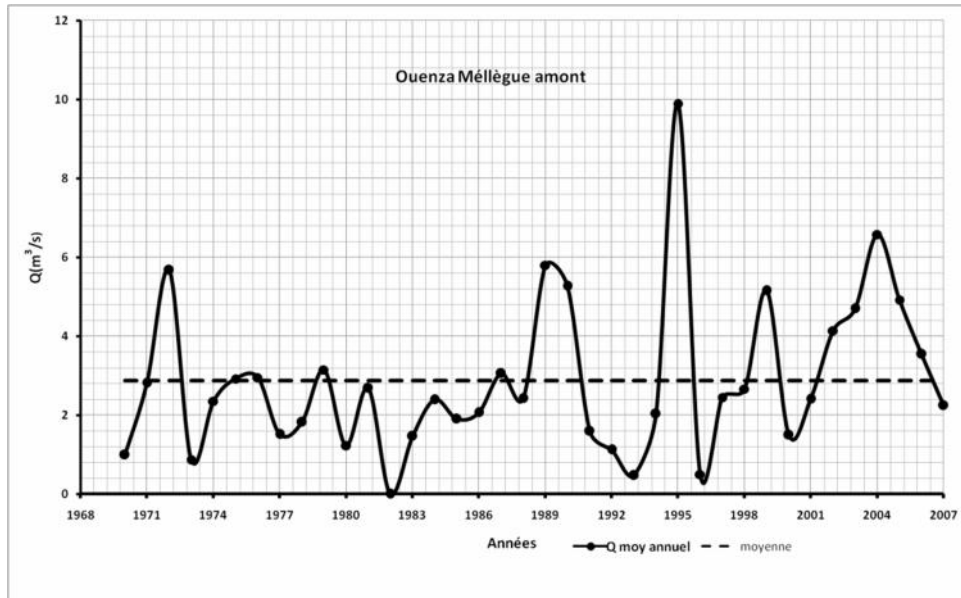


Figure 6.3 : Variation du débit moyen annuel à la station d'Ouenza.

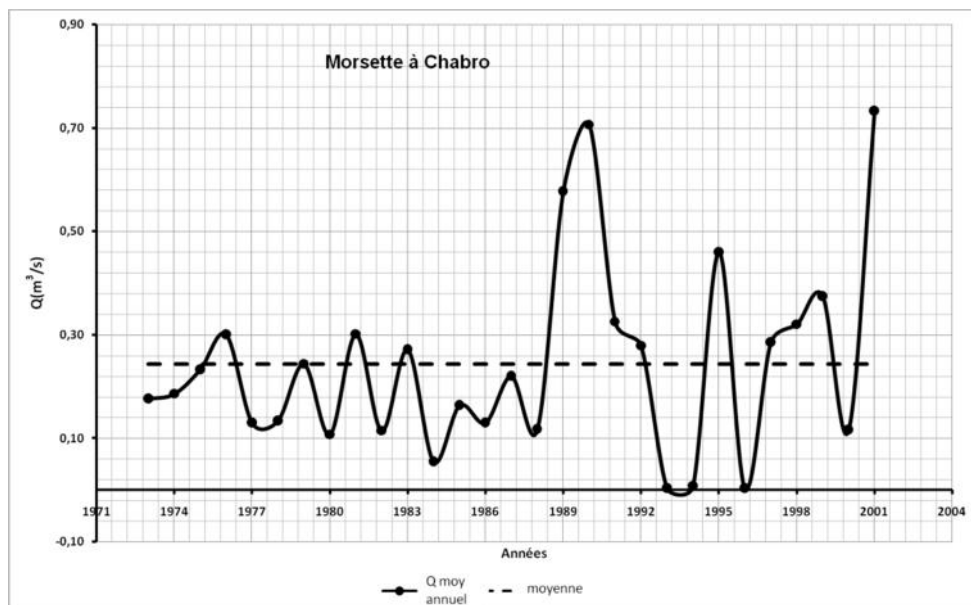


Figure 6.4 : Variation du débit moyen annuel à la station de Morsette.

6.3.2. Ecoulements moyens mensuels et saisonniers

L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence les régimes des cours d'eau et leurs variations inter annuelles ou inter saisonnières. Ces régimes peuvent être traduits par divers critères numériques et graphiques parmi lesquels on retiendra, principalement les coefficients mensuels de débits (C.M.D).

6.3.2.1. Coefficient mensuel de Débits

Les coefficients mensuels ou rapports des débits moyens mensuels au module de la période considérée, pris pour l'unité, ont l'avantage de permettre la comparaison des variations saisonnières du régime des cours d'eau de débits très différents. Les CMD inférieurs à l'unité correspondent aux mois de basses eaux et les CMD supérieures à l'unité représentent les mois de hautes eaux (Tableau 6.3). L'examen de ce dernier et des histogrammes des figures 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, montrent que les maxima mensuels sont observés au mois de mars pour la station de Souk-Ahras, alors que les minima mensuels sont enregistrés en septembre, juin, juillet et août. Les régimes moyens de ces bassins à alimentation essentiellement pluviale comportent généralement des hautes eaux de saison froide, de janvier à mai et des basses eaux de saison chaude, de juin à septembre (Oued Medjerda). Pour le bassin de l'Oued Mellegue (Ouenza, El-Aouinette), la période des hautes eaux commence en Septembre, et diminue en saison hivernale et commence en saison printanière raison vraisemblablement de l'énorme capacité d'infiltration qu'offre son bassin concomitant à une évaporation élevée, les pluies du début de l'année climatique n'interviennent donc pas efficacement au soutien de l'écoulement superficiel. Par ailleurs, la période des basses eaux est assez décalée dans le temps, elle ne commence qu'au mois de juin du fait de l'importance relative des précipitations de printemps. La moyenne mensuelle minimale est également retardée, elle se situe en août. Nous pensons que ceci est lié à l'alimentation de l'oued par des circulations d'eaux souterraines qui soutiennent l'écoulement. Pour le bassin de l'oued Chabro (Morsette), la période des hautes eaux est nettement marquée au cours de mois : septembre, novembre et janvier, mais les CMD tombent au dessous de l'unité pendant les trois mois suivants avant de croître à nouveau en mai, juin et juillet. La moyenne mensuelle maximale se situe en janvier.

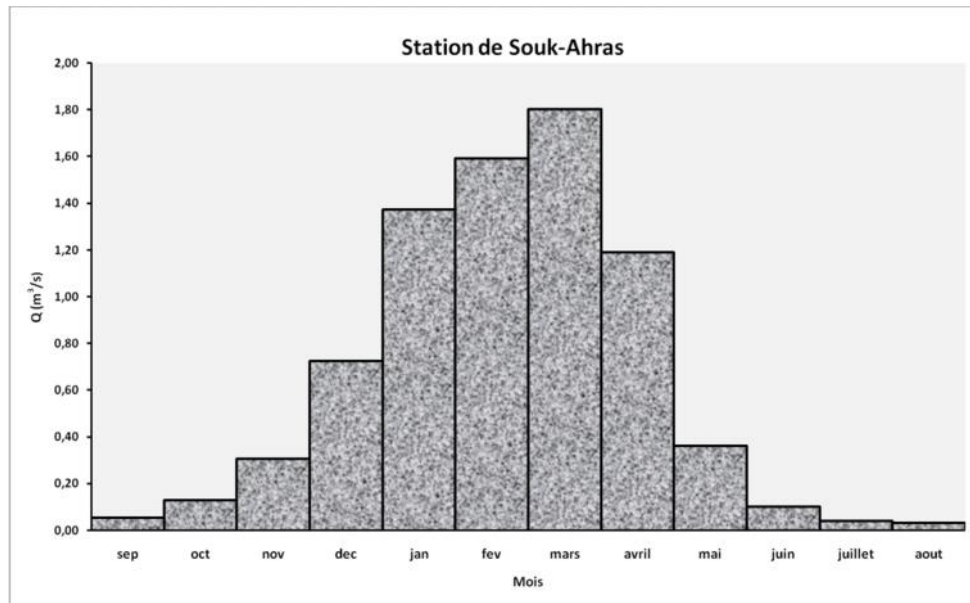


Figure 6.5 : Répartition des débits moyens mensuels à la station de Souk-Ahras.

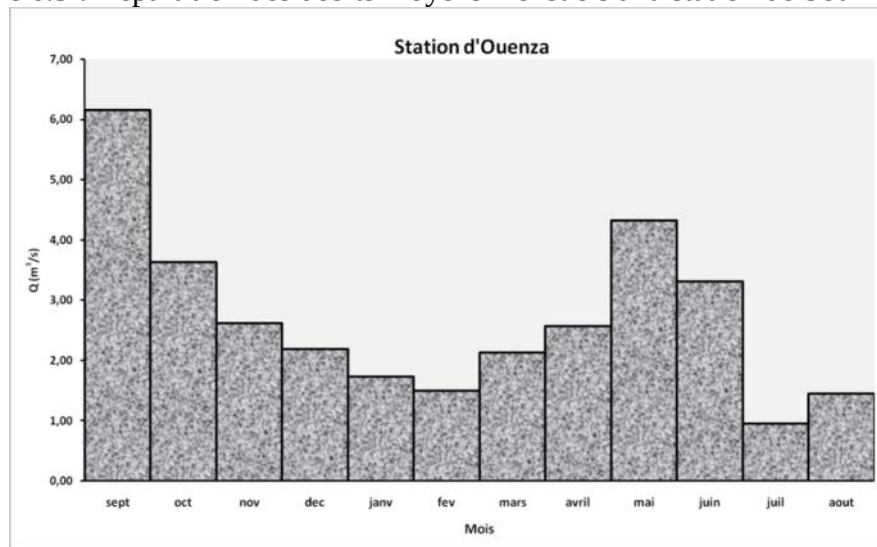


Figure 6.6 : Répartition des débits moyens mensuels à la station d'Ouenza.

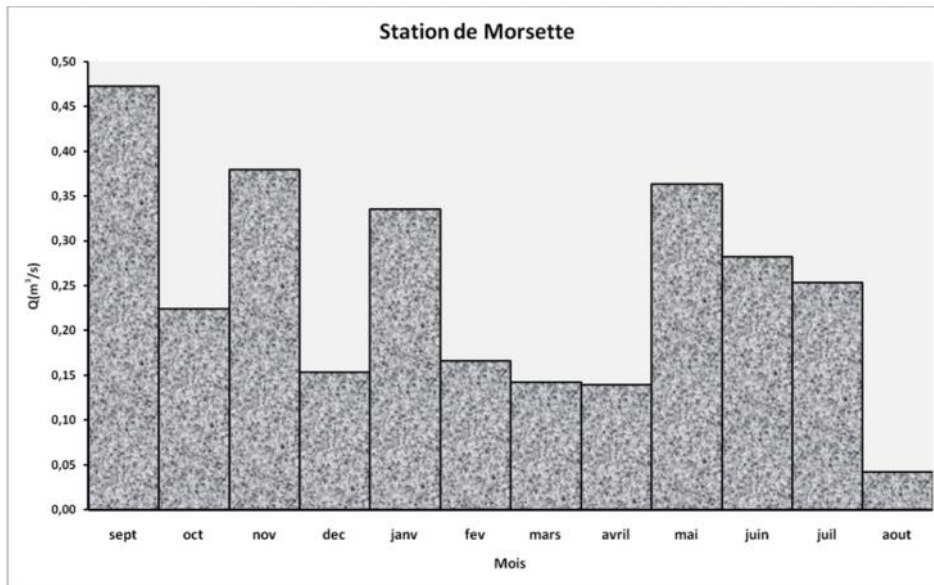


Figure 6.7 : Répartition des débits moyens mensuels à la station de Morsette.

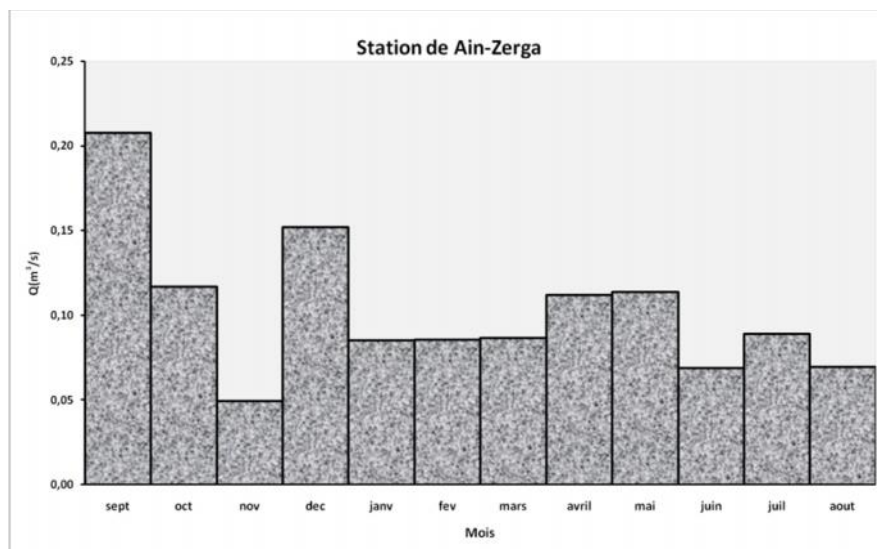


Figure 6.8 : Répartition des débits moyens mensuels à la station d'Ain-Zerga.

Coefficient de variation

L'irrégularité mensuelle et saisonnière des débits (Tableau 6.2) ressort parfaitement des valeurs calculées du Cv pour les différentes stations et pour les différents mois de l'année. Il apparaît en effet que, l'écoulement mensuel est extrêmement variable, pour certains mois le coefficient de variation dépasse largement l'unité et est compris entre 1.41 et 1.27 pour Souk-Ahras, entre 0.91 et 0.98 pour Ain-Zerga, entre 0.79, 1.38 et 1.06, 1.35 pour l'Ouenza et El-Aouinette et entre 0.70 et 1.31 pour Morsette. La variabilité inter mensuelle des débits est

accentuée dans l'ensemble, ceci à cause vraisemblablement de la faiblesse des précipitations de ces dernières décennies et de leur caractère très aléatoire. Ces données attestent d'une variabilité du régime encore plus marquée qu'à l'échelle annuelle. Contrairement aux précipitations, la plus forte variabilité de l'écoulement fluvial concerne la période de saison froide ou de hautes eaux, ceci s'explique par l'importance et la fréquence élevée des crues en saison froide. Au contraire, la variabilité relativement modérée des basses eaux peut être justifiée par la fréquence limitée des crues en saison chaude, ainsi que, par le rôle prépondérant des eaux souterraines alimentant les cours d'eau en périodes d'étiages.

Tableau 6.3 : Répartition des débits mensuels des oueds de la Medjerda

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
Oued Medjerda Souk-Ahras 1969-2007													
CMD	0,08	0,202	0,476	1,131	2,139	2,479	2,809	1,856	0,562	0,155	0,061	0,050	1.0
CV	0,80	0,59	0,38	0,55	0,83	1,02	0,63	1,41	1,27	1,83	2,47	2,06	1,35
Oued Zergua Ain-zerga 1973-2003													
CMD	2,00	1,12	0,47	1,46	0,82	0,82	0,83	1,08	1,09	0,66	0,86	0,67	1,00
CV	0,68	0,41	0,73	0,31	0,64	0,74	0,54	0,60	0,71	0,91	0,41	0,47	0,98
Oued Mèllegue Ouenza 1970-2007													
CMD	2,27	1,34	0,96	0,81	0,64	0,55	0,78	0,95	1,59	1,26	0,35	0,53	1,00
CV	0,49	0,72	0,51	0,41	0,44	0,53	0,42	0,71	0,64	0,79	0,45	0,40	1,38
Oued Mellegue El-Aouinette 1973-1984													
CMD	1,38	0,88	1,61	0,95	0,34	1,04	0,75	1,13	1,39	1,25	0,61	0,68	1,00
CV	0,72	1,06	0,63	0,66	1,35	0,64	0,81	0,65	0,62	0,82	0,52	0,76	1,96
Oued Chabro Morsette 1973-2001													
CMD	1,94	0,92	1,56	0,63	1,37	0,68	0,59	0,57	1,49	1,16	1,04	0,17	1,00
CV	0,62	0,70	0,43	0,52	0,41	0,49	0,65	0,58	0,54	0,55	0,30	0,40	1,31

6.3.3. Ressources mensuelles en eau de surface disponibles

Les disponibilités en eau sont plus importantes pendant les mois de hautes eaux par opposition au déficit marqué des mois de basses eaux (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 : Disponibilités mensuelles moyennes et extrêmes en eaux de surface (10^6 m^3) des bassins des oued Medjerda, Mellegue, Zerga et Chabro.												
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^T	A
Oued Medjerda Souk-Ahras												
Apport max	1.24	3.78	17.4	26.38	28.73	27.70	67.83	15.91	5.90	0.89	0.31	0.22
Apport min	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.38	0.00	0.15	0.00	0.00
Apport moy	0.23	0.65	1.52	3.38	6.67	7.07	8.83	5.91	1.74	0.43	0.15	0.09
Rapports extrêmes	-	-	870					11.53		5.93		
Oued Mellegue Ouenza												
Apport max	180.05	51.97	59.96	76.19	45.55	31.20	77.26	36.07	86.84	47.69	31.31	83.84
Apport min	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Apport moy	15.96	09.72	06.79	05.87	04.64	03.63	05.70	06.66	11.57	08.59	02.56	6.49
Rapports extrêmes	18005			-	4555	3120	7726		8684			
Oued Mellegue Aval												
Apport max	1.13	0.99	1.83	1.54	3.76	2.03	3.26	3.22	2.56	1.68	1.21	0.85
Apport min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Apport moy	0.21	0.20	0.28	0.28	0.43	0.38	0.53	0.50	0.37	0.27	0.21	0.21
Rapports extrêmes	113	99	183	154	-	-	-	-	-	-	-	-
Oued Zerga												
Apport max	2.70	3.63	0.82	7.23	1.66	1.30	2.23	2.19	1.76	0.89	3.06	1.77
Apport min	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Apport moy	0.54	0.31	0.13	0.41	0.23	0.21	0.23	0.29	0.30	0.18	0.24	0.18
Rapports extrêmes		-	82	723	166	65	-	219	176	-	-	-
Oued Chabro												
Apport max	8.70	3.60	10.68	3.28	10.43	3.70	2.41	2.76	7.77	5.21	11.81	1.45
Apport min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Apport moy	1.27	0.60	0.99	0.41	0.90	0.39	0.37	0.34	0.91	0.68	0.68	0.11
Rapports extrêmes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La moyenne de ces apports mensuels varie entre 0.15 et 8.83 Hm^3 pour l'oued Medjerda à Souk-Ahras, entre 2.56 et 15.96 Hm^3 pour l'oued Mellègue amont à Ouenza. Entre 0.21 et 0.53 Hm^3 pour Mellègue aval et entre 0.13 et 0.54 Hm^3 pour l'oued Zerga. Le maximum enregistré au mois de mars, peut atteindre 67.83 hm^3 pour l'oued Medjerda. 180.05 hm^3 au mois de septembre à oued Mellègue amont et 3.76 Hm^3 au mois de janvier pour Mellègue

aval. 11.81 hm^3 au mois de juillet à l'oued Chabro et 7.26 hm^3 au mois de décembre pour l'oued Zerga.

Les moyennes de la période ne sont pas significatives, il est nécessaire de prendre en considération les apports mensuels extrêmes et leurs rapports respectifs afin de mesurer l'amplitude des disponibilités potentielles en eau. Les rapports entre les extrêmes sont considérables; ils atteignent leur maximum en saison froide et s'atténuent relativement en été. Ainsi, les ressources en eau superficielles sont soumises à de très fortes variations saisonnières qui vont dans le sens inverse des besoins: ressources en excès en saison froide où les besoins sont relativement modérés, ressources déficitaires en saison chaude où les besoins surtout agricoles, sont extrêmement élevés en raison des conditions bioclimatiques des bassins.

6.4. Fluctuations hydro climatologiques dans les bassins versants

6.4.1. Méthodologie appliquée

Les variations hydro climatologiques interannuelles sont caractérisées à partir des débits moyens annuels des différentes stations des deux bassins Medjerda au Nord et Méllègue au Sud. La méthode adoptée est celle des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Q_i) au débit moyen interannuel $\bar{Q}$:

$$Ec(\%) = \left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{Q_i} \right) \times 100 \quad (6.1)$$

Cette méthode, utilisée par Riehl et al. (1979) sur le Nil, par Probst et Tardy (1985) sur les grands fleuves mondiaux et par Echanchu (1988) sur la Garonne (Khaldi., 2005), permet de distinguer les périodes humides (courbe croissante) des périodes sèches (courbe décroissante).

La détermination de ces écarts dans toutes les stations autorise une étude comparative sur l'ensemble des deux bassins.

Pour retracer les périodes climatiques, un coefficient hydro climatique moyen (**Chm**) (Khaldi., 2005) à partir de l'écart des débits liquides annuels par rapport au débit moyen

interannuel $\bar{Q}$ a été calculé pour toutes les stations et, pour chacune d'entre elles, les écarts ont été pondérés par la taille des sous bassins versants correspondants, ce qui donne :

$$Chm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{ci} \times \frac{S_i}{S_{ext}}) \quad (6.2)$$

Avec

n : nombre de stations ;

E_{ci} : écart du débit moyen annuel par rapport au débit interannuel ;

S_i : superficie du sous bassin versant (Km²) ;

S_{ex} : superficie du bassin à la station la plus en aval (Km²).

6.4.1.1. Bassin de la Medjerda Nord

Les variations de ce coefficient en fonction des années (Figure 6.9) montrent qu'au cours de l'épisode compris entre 1969-2007,

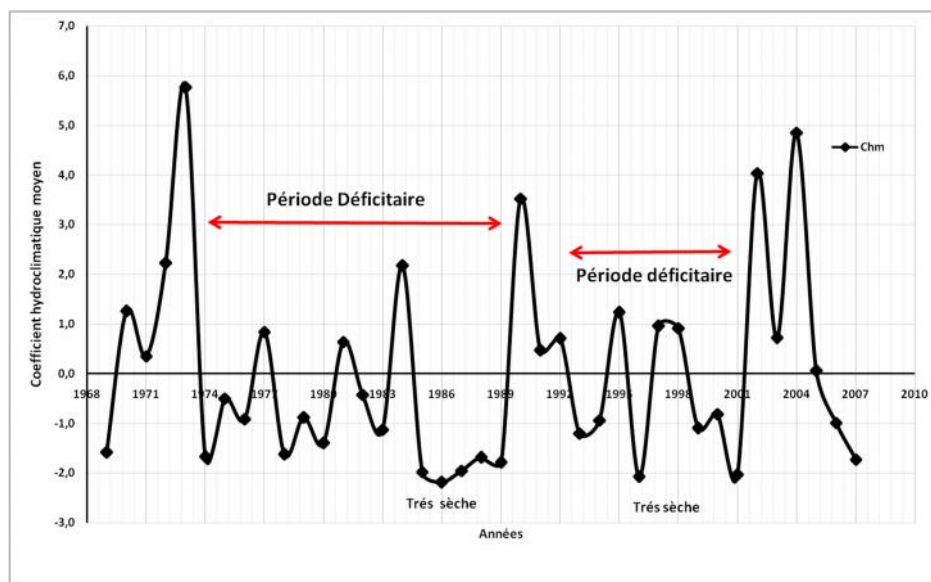


Figure 6.9: Variations annuelles du coefficient hydro climatique moyen (Chm) du bassin d'Oued Medjerda.

le bassin de la Medjerda a connu une alternance d'années humides (de 3 à 9 ans maximum) et d'années sèches (ne dépassant pas 5 années consécutives). Pendant cette période, on distingue le début des décennies 70 et 2000 par un excédent. A partir de 1973, une période très sèche de plus de 19 ans s'est observée sur ce bassin.

Il est important de souligner que la décennie 2000 est caractérisée par un écoulement relativement important ce qui correspond à l'évolution des précipitations durant cette décennie.

6.4.1.2. Bassin de Medjerda Mèllègue Sud

Les variations de ce coefficient en fonction des années (Figure 6.10) montrent qu'au cours de l'épisode compris entre 1973 et 1987, le bassin de la Mèllègue a connu un épisode déficitaire très important suivi d'une période excédentaire. Après ces deux périodes, on distingue également 4 années successives à caractère déficitaire (1991-1994) et vers une reprise croissante sur les années qui les suivent et un excédent à caractère climatique exceptionnel en 1995.

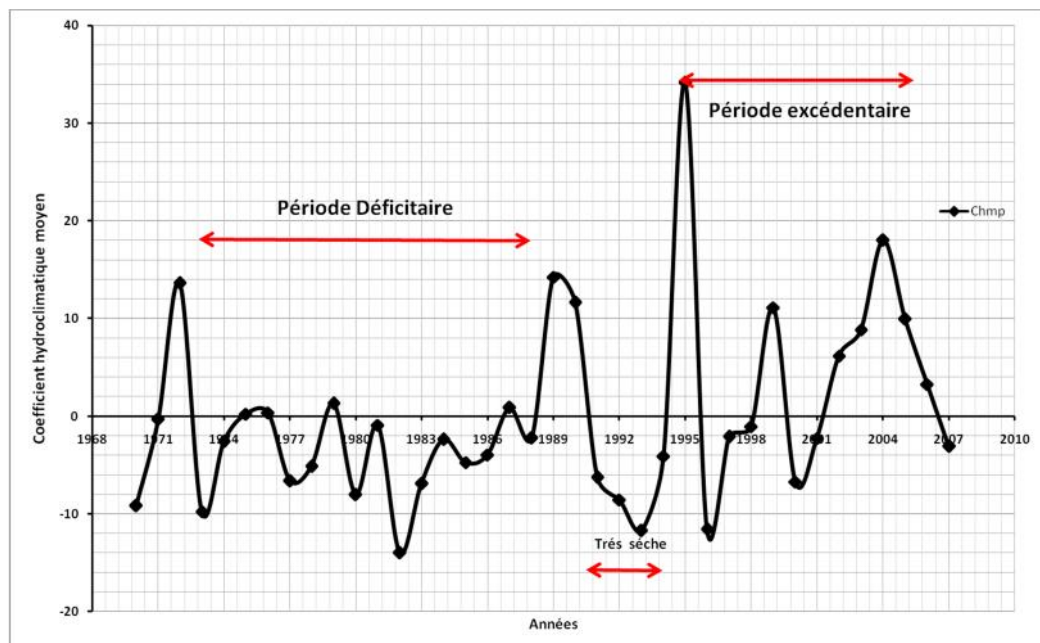


Figure 6.10: Variations annuelles du coefficient hydro climatique moyen (Chm) du bassin d'Oued Mèllègue.

6.5. Conclusion

Lors de cette étude hydrologique des deux bassins, nous avons constaté que chacun des deux a un comportement qui lui est approprié :

Les eaux de surface du bassin de la Medjerda sont drainées par deux grandes artères fluviales: l'oued Medjerda au Nord et l'oued Méllègue au Sud. L'évolution du régime hydrologique est presque synchrone d'une station à l'autre.

Le minimum mensuel est plus instable que le maximum mensuel: sur l'oued de la Medjerda, le maximum moyen s'observe en février, mars (période des hautes eaux mensuelles) et sur l'oued Mellegue et Chabro le maximum moyen s'observe en septembre, novembre et décembre (période des hautes eaux mensuelles) caractérisant ainsi le régime pluvial méditerranéen. Ce régime, se calque sur les variations pluviométriques, qui elles même sont liées à la variabilité de la circulation atmosphérique globale d'où l'instabilité des maxima et des minima mensuels d'une année à l'autre.

Les dates du minimum mensuel connaissent aussi une dispersion dans le temps, mais le minimum moyen se localise en Août.

La forme géomorphologique du bassin de la Medjerda et la forte dissymétrie dans la répartition des pluies entre le Nord et le Sud déterminent les régimes hydrologiques des différents cours d'eau.

D'après cette analyse, il apparaît que nos bassins versants ont un **régime pluvial méditerranéen caractérisé par une forte irrégularité**.

Toutefois, les fluctuations hydro climatiques observées sur d'aussi longues périodes (1968-2007 pour le bassin de la Medjerda au Nord et 1969-2007 pour le bassin de Méllègue) peuvent être généralisées à l'ensemble des stations des deux bassins.

On remarque, avant 1973, une persistance de l'alternance d'épisodes humides et secs. Après 1973, on peut distinguer une nette décroissance continue des débits moyens qui atteint son paroxysme de 1992 à 1996. Une augmentation des débits moyens est observée vers la fin de la décennie 90 pour le bassin d'étude.

Par conséquent, les déficits pluviométriques et hydrologiques peuvent renforcer l'écart entre les besoins importants en eau d'une population sans cesse croissante et les ressources hydriques pouvant être mobilisées.

Chapitre 7

Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques

7.1. Introduction

La sécheresse qui a affecté les pays du Maghreb, et l'Algérie en particulier, depuis les années 1970. Et les résultats du chapitre 5 de cette étude montre que :

1. Le bassin de la Medjerda connaît aussi une réduction de la pluviométrie au total ;
2. une augmentation de la température sur une période allant de (1913-1938) à (1969-2007) et ;
3. une tendance à l'augmentation des pluies de forte intensité durant la période 2000 - 2007.

Donc on peut dire que, c'est une sécheresse climatique qui a changé l'emplacement des isohyètes interannuelles de cette zone. Ceci peut avoir une incidence sur les différents compartiments du cycle de l'eau: par exemple la baisse sensible des niveaux des rivières, des lacs et de retenues collinaires. Et les modifications des conditions de précipitation et d'évapotranspiration avec le changement climatique ont des impacts visibles sur les débits des rivières. Comment ce sont traduits ces modifications et quelles perspectives pouvons-nous envisager « cas du bassin versant Medjerda Nord Est Algérie » ?

7.2. Les régimes des débits et leur évolution avec les précipitations

La démarche s'appuie sur une étude climatique, basée sur des méthodes statistiques, et sur l'évaluation des modifications des conditions hydriques.

7.2. 1.Méthode de la variable centrée réduite

Cette méthode permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométrique et hydrologique de la région (voir chapitre 5).

7.2. 2.Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2

Une meilleure observation des fluctuations interannuelles s'obtient en éliminant les variations saisonnières. Dans ce cas, les totaux pluviométriques annuels sont pondérés en utilisant les équations suivantes recommandées par Assani (1999) :

$$x_{(t)} = 0.06x_{(t-2)} + 0.25x_{(t-1)} + 0.38x_{(t)} + 0.25x_{(t+1)} + 0.06x_{(t+2)} \quad (7.1)$$

Pour $3 \leq t \leq (n-2)$

Où $x_{(t)}$ est le total pluviométrique pondéré du terme t , $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t , $x_{(t+2)}$ et $x_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques des deux termes qui suivent immédiatement le terme t . Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers $[x_{(1)}, x_{(2)}]$ et des deux derniers $[x_{(n-1)}, x_{(n)}]$ termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$x_{(1)} = 0.54x_{(1)} + 0.46x_{(2)} \quad (7.2)$$

$$x_{(2)} = 0.25x_{(1)} + 0.50x_{(2)} + 0.25x_{(3)} \quad (7.3)$$

$$x_{(n-1)} = 0.25x_{(n-2)} + 0.50x_{(n-1)} + 0.25x_{(n)} \quad (7.4)$$

$$x_{(n)} = 0.54x_{(n)} + 0.46x_{(n-1)} \quad (7.5)$$

Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenues sont calculés pour mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques. Les séries de débits sont soumises aux mêmes procédures de calculs que les séries pluviométriques. Les variations interannuelles hydro-pluviométriques aux stations de Souk-Ahras, Ouenza et Tébessa sont caractérisées par une alternance d'années humides, normales et sèches. Une illustration des différents découpages obtenus aux stations du bassin d'étude est donnée par les figures 7.1, 7.2, 7.3. On entend par période normale, une période où les indices se répartissent de façon équilibrée de part et d'autre du zéro de l'axe des abscisses. Puis une période sèche de 1985 à 1998 coupées par deux années humides de 1990 à 1991. En

examinant le Tableau 7.1, on constate en outre que les écarts-types des sous-séries (différentes périodes) sont souvent proches les uns des autres,

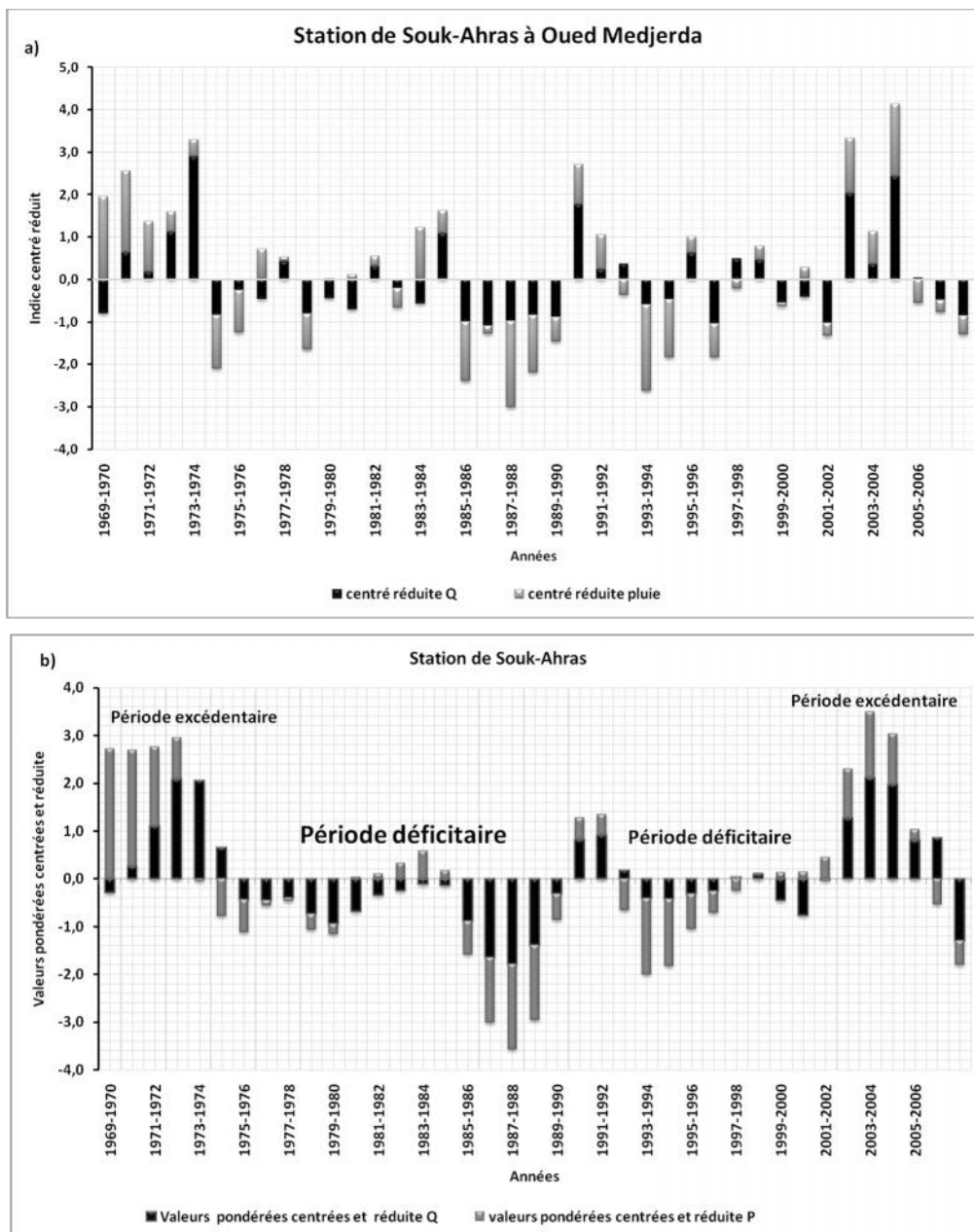


Figure 7.1: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Medjerda à la station de Souk-Ahras de 1969 à 2007.

mais généralement plus faibles que les écarts-types globaux. L'évolution des indices centrés réduits montre ainsi une importante variation des écoulements de l'oued Medjerda à Souk-Ahras. Cette grande variabilité se traduit par un écart de $3.59 \text{ m}^3/\text{s}$ entre la plus forte valeur du module annuel ($3.79 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1972-73) et la plus faible ($0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1986-87).

Le filtrage a permis de mieux visualiser la variation des écoulements de cet Oued (Figure 7.1.b) en faisant ressortir de façon nette :

1. Une période humide ; de 1970 - 1975 et de 2002 - 2006,
2. Une période sèche ; de 1976 -2001 coupée par deux années humides 1990 et 1991.

Tableau 7.1 : Différents découpages obtenus pour les trois stations

	Station de Souk-Ahras		Station d'Ouenza		Station de Tébessa
P.H	1969-1973	1999-2007	1969-1989	1994-2002	1969-1976
« (mm)	820.49	614.35	280.76	280.00	433.07
±	134.51	165.04	86.31	85.26	124.80
P.S	1985-1998		1990-1993	2003-2007	1977-2000
« (mm)	497.34		151.80	213.13	309
±	170.83		74.57	94.77	106
« global (mm)	554.50		263.38		354.87
± global	192.18		94.97		120.32

PH : période humide.

PS : période sèche.

μ : moyenne de la série pluviométrique au cours de la période considérée.

σ : écart-type de la série.

D'après la figure 7.2, on observe au niveau de la station de l'Ouenza, une période humide de 1970 à 1981, et une période sèche de 1982 à 1993 coupée par trois années humides de 1987 à 1989, une période normale de 1994 à 2003 coupée par deux années sèches de 1999 à 2000 et une autre période sèche de 2004 à 2007.

Enfin, station de Tébessa située dans le sud est du bassin d'étude (Figure 7.3) se distingue par des précipitations annuelles moyennes un peu moins élevées de 1969 à 2001.

Cette période se distingue par une alternance de périodes sèches et humides. Une période humide allant de 1969 à 1976 (précipitations annuelles moyennes de 433.07 mm) et une période sèche de 1977 à 1988 et de 1990 à 2000 (précipitations annuelles moyennes de 309 mm).

Le filtrage a permis aussi de mieux visualiser la variation des écoulements dans l'oued Mèllègue à Ouenza et l'Oued Chabro à Tébessa en faisant ressortir de façon nette:

1. Une période humide; de 1987 - 1990, 1994 - 2003 à Ouenza, et de 1988 - 1991, 1998 - 2001 à Tébessa.
2. Une période sèche; de 1972 -1987, de 1990 - 1993 à Ouenza, et de 1972 – 1987, de 1992 - 1997 à Tébessa.

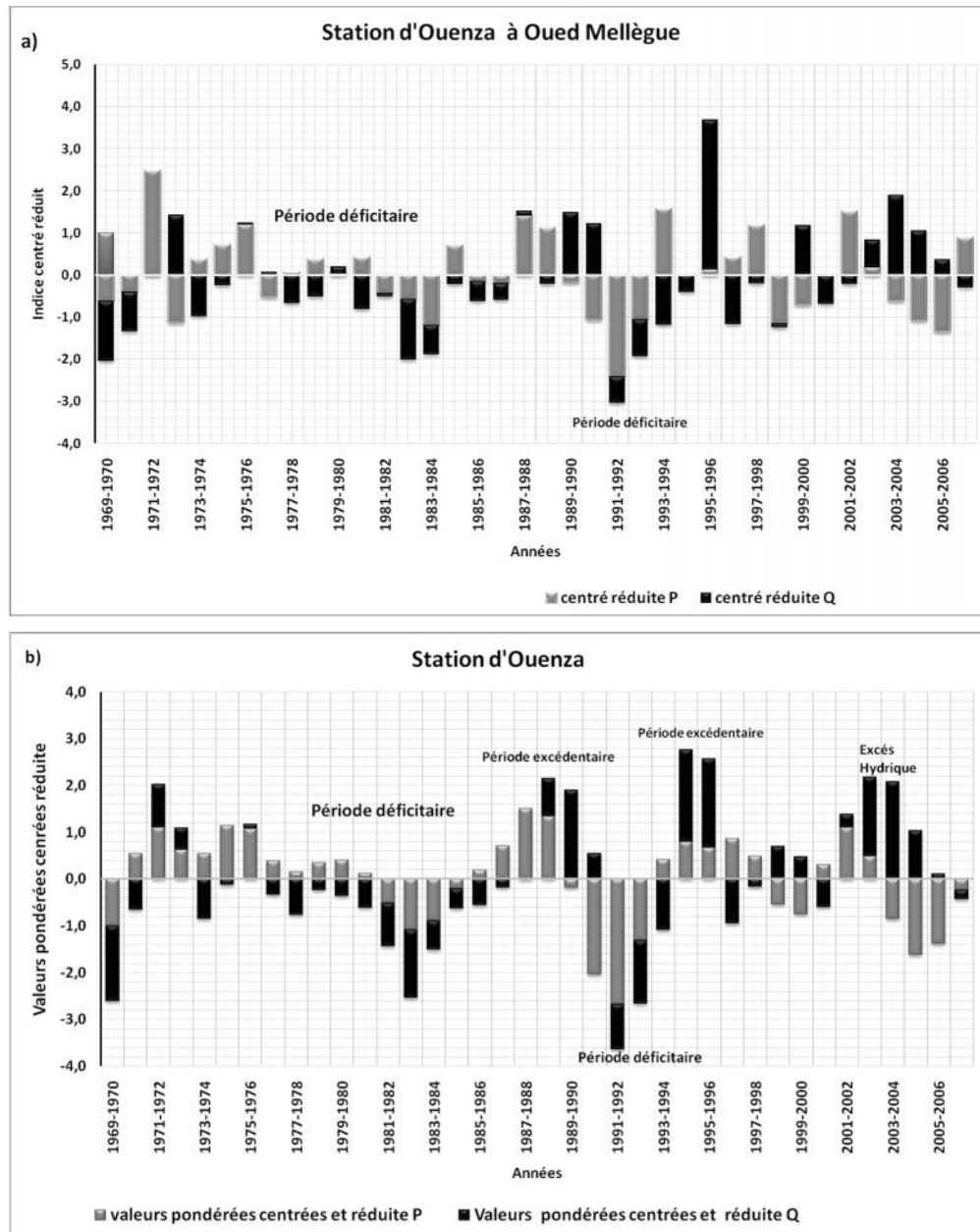


Figure 7.2: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Mellègue à la station d'Ouenza de 1969 à 2007.

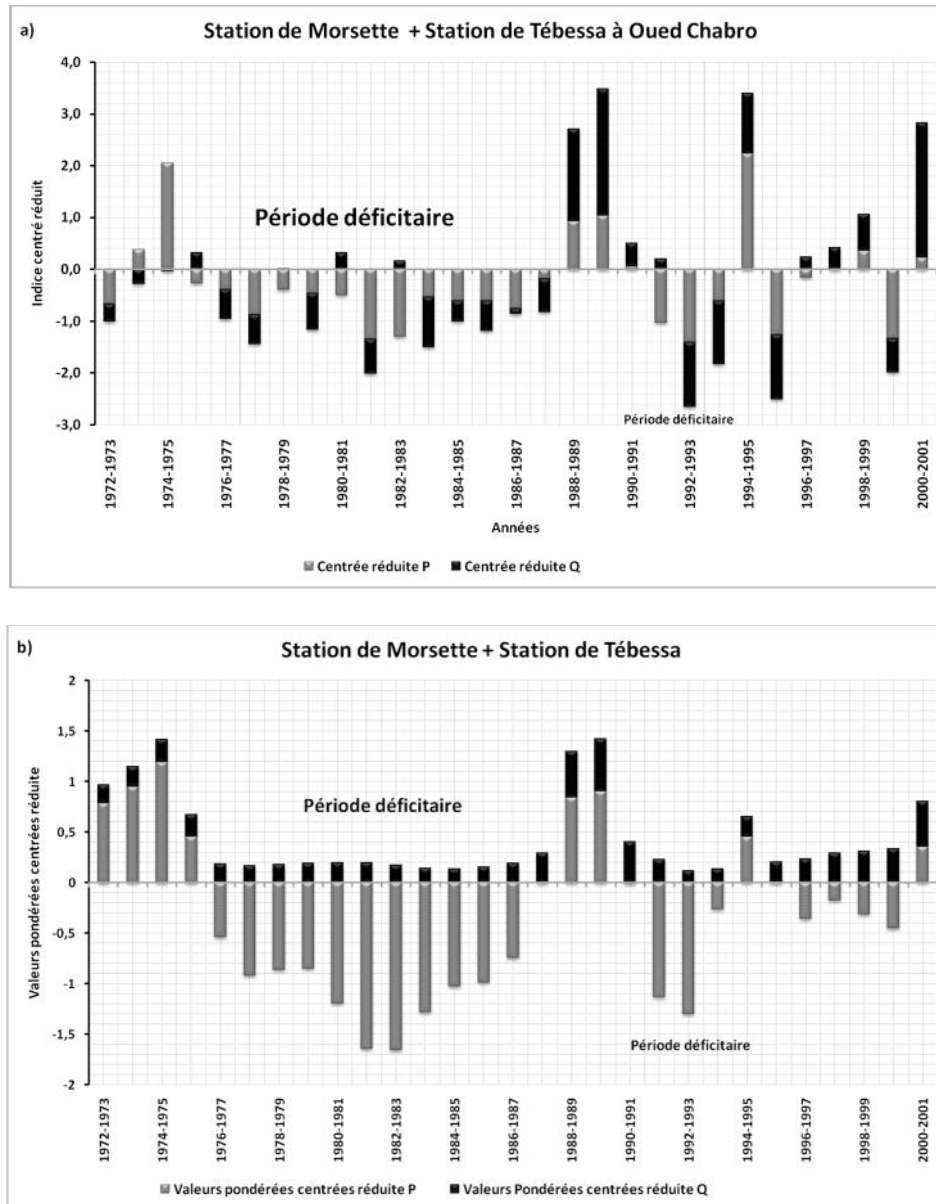


Figure 7.3: Variation interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels et de la pluviométrie a) et des modules annuels pondérés de la pluviométrie pondérée b) du l'Oued Chabro à la station Tébéssa de 1969 à 2001.

Les courbes montrent que ces rivières présentent une grande variabilité des débits au cours du temps. Les modules annuels de la Medjerda sont presque toujours supérieurs à ceux des deux autres cours d'eau.

7.2. 3.Méthodes statistiques de détection des ruptures

Les analyses statistiques ont été menées à travers le logiciel KRONOSTAT (1998) de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD).

Dans cette étude, nous avons retenu le test de PETTIT pour leur puissance et leur robustesse.

7.2. 3.1. Test de PETTIT (voir chapitre 5)

Le test de PETTIT a permis de situer les années de rupture au sein des séries hydrologiques du bassin de la Medjerda. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 7.2.

Tableau 7.2 : Test statistique, années de rupture et variation dans les séries hydrologiques du bassin de la Medjerda.

Station	Période d'observation	Moyenne	Test de Pettit	Moy avant	Moy après
Hydrométrie (m3/s) Souk-Ahras	1969-2007	1.19	1989	1.05	1.35
Hydrométrie (m3/s) Ouenza	1969-2007	2.84	1994	2.34	3.63
Hydrométrie (m3/s) Morsette	1972-2001	0.24	1988	0.18	0.32

Pour les séries pluviométriques, les dates de rupture se localisent dans les décennies 80 et 90 (Tableau 7.2). De même pour les séries hydrologiques, les dates de rupture se localisent dans les décennies 80 et 90 (Tableau 7.2).

De ce qui précède, il ressort que les ruptures hydrologiques sont en phase avec les ruptures pluviométriques. Cette concordance des dates des décennies rupture montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.

7.3. Bilan hydrique

Pour l'évapotranspiration de référence son estimation est calculée par la méthode de Turc (Musy., 2001) compte tenu des données disponibles.

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. La température de l'air joue un rôle important dans son calcul.

Une grande partie de la variabilité des débits annuels s'explique par la variation de la pluviométrie et des températures, que l'on peut synthétiser avec le bilan hydrique (précipitation moins évapotranspiration).

Le bilan hydrique a été établi à la station de Souk-Ahras à partir de 1969, date à partir de laquelle les mesures de la température sont disponibles. Pour mieux apprécier l'impact de la

variabilité climatique, nous avons établi le bilan hydrique avant et après rupture dans les séries pluviométriques.

Le bilan hydrique à la station de Souk-Ahras, où la rupture pluviométrique est intervenue en 1999, portent sur les périodes 1969-1999 et 2000-2007 (Tableau 7.3). Nous obtenons respectivement avant et après rupture des valeurs annuelles moyennes de 528.66 et 615.21 mm pour les précipitations, 345.24 et 389.62 mm pour l'évapotranspiration et 183.42 et 225.59 mm pour l'excédent ou infiltration efficace.

Tableau 7.3: Bilan hydrique à la station de Souk-Ahras.		
Période	1969-1999(avant rupture)	1999-2007 (après rupture)
P(mm)	528.66	615.21
ETR (mm)	345.24	389.62
Excédent (mm)	183.42	225.59

P : précipitations annuelles moyennes.

ETR : évapotranspiration réelle annuelle moyenne.

Excédent : P - ETR.

La comparaison des excédents obtenus à partir du bilan hydrique donne une idée de l'impact des modifications pluviométriques sur la recharge des aquifères. À la station de Souk-Ahras, l'excédent (ou "infiltration efficace"), qui constitue la part des précipitations susceptible d'atteindre les nappes souterraines, est passé de 183.42 mm (avant rupture 1999) à 225.59 mm (après rupture 1999), soit une augmentation de 23 %.

7.3.1. Evolution interannuelle des paramètres climatiques

Sur les figures 7.4, 7.5, 7.6 et 7.7 la tendance des débits annuels est fortement calée sur celle du bilan hydrique, elle-même déterminée par celle des précipitations sur le long terme. En ajoutant la forte montée des températures depuis 1985 et donc de l'évapotranspiration, on peut alors expliquer une grande partie de la variabilité et de la tendance des débits d'oued Medjerda. La diminution des précipitations est bien apparente dans les années 80 et les années 90, où une longue période de phénomène de sécheresse de 3 années successives est observée vers la fin de la décennie 80 et le début de la décennie 90. L'évolution de l'évapotranspiration de référence et de la température est inverse par rapport à celle de la pluviométrie (Figure 9.5). L'augmentation de la température influe négativement sur la disponibilité des ressources en eau de la région d'étude. Cette influence se traduit par l'augmentation des pertes par évaporation (Henia et benzarti, 2006; Amoussou et al, 2006).

Les périodes de déficit hydrique sont observées au niveau de l'oued Medjerda à la même date de la succession des années de sécheresse. Cette concordance des dates de déficit montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par (Mebarkie., 2010; Meddi., 2009) dans des études récentes en Algérie orientale. Ils mettent, en évidence une diminution pluviométrique au cours des dernières décennies, et aussi 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sécheresse hydrologique (faible hydraulité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002.

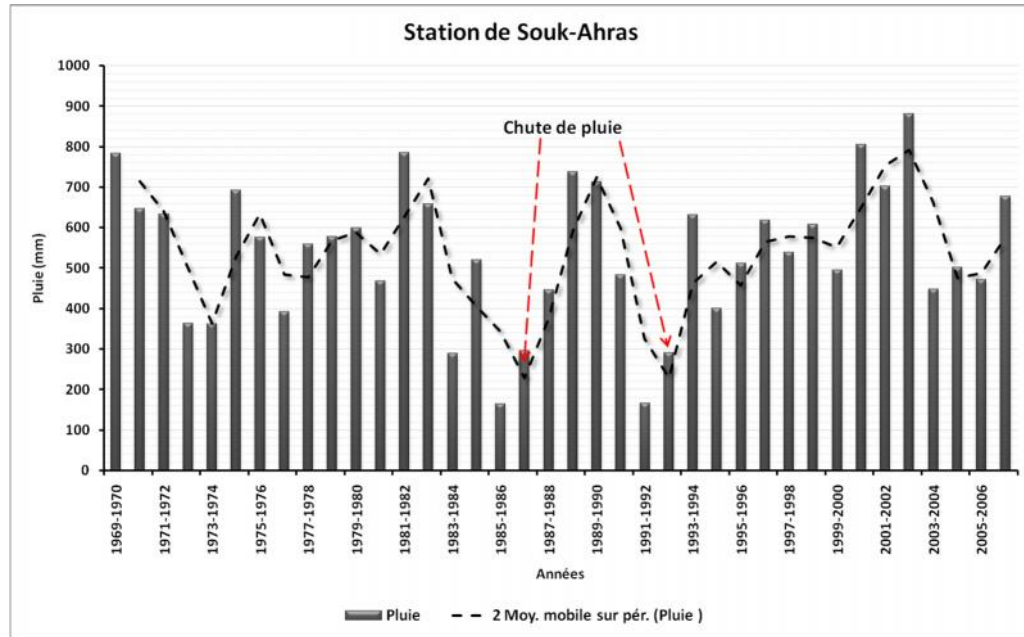


Figure 7.4: Variation interannuelle de la pluviométrie à la station de Souk-Ahras

+

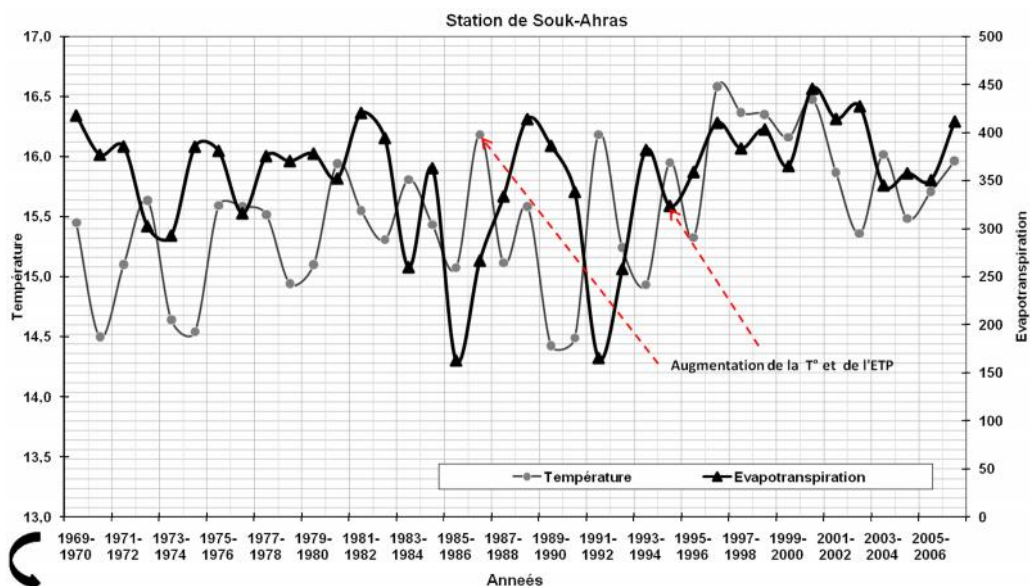


Figure 7.5: Evolution des paramètres climatiques à la station de Souk-Ahras

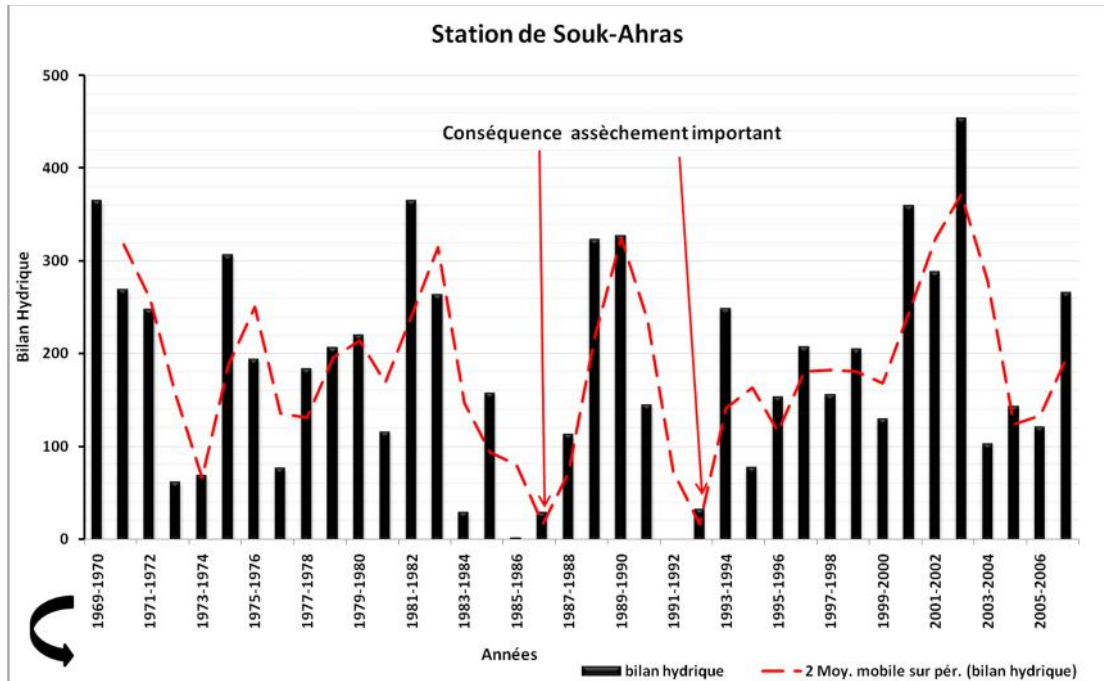


Figure 7.6: Variation du bilan hydrique à la station de Souk-Ahras.

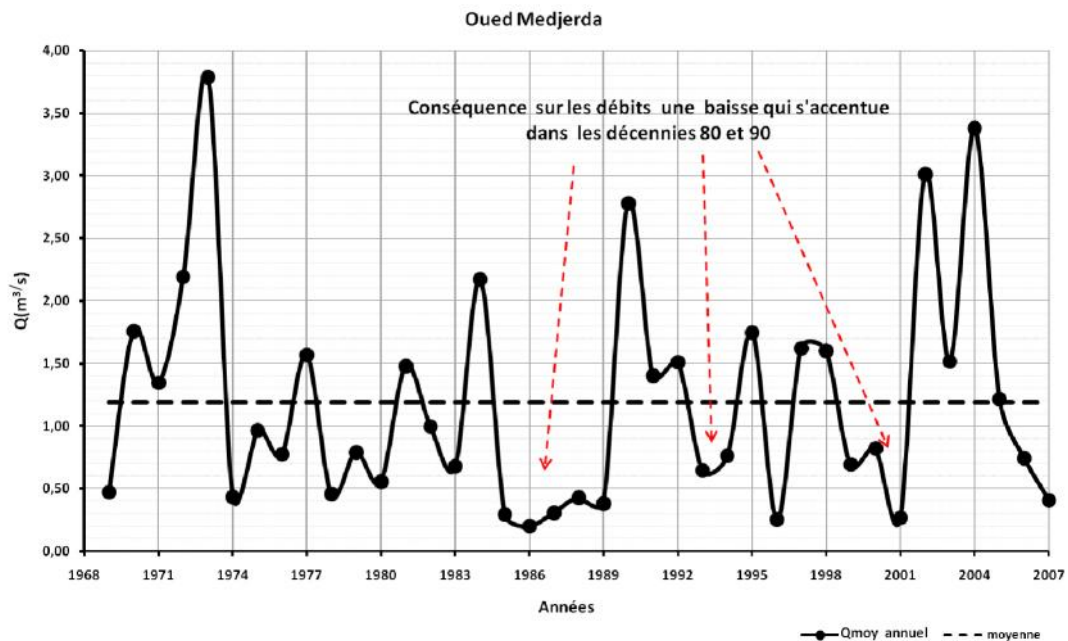


Figure 7.7: Variation interannuelle des écoulements à la station d'oued Medjerda.

7.4. Etude du phénomène de tarissement par la loi de maillet

7.4. 1. Evaluation du tarissement dans les bassins versants de Medjerda Mellègue

Pour évaluer les tarissements sur les différents bassins, l'application de la loi de la décroissance exponentielle de Maillet est requise. Cette loi est donnée par l'équation 7.6 :

$$Q_{(t)} = Q_0 e^{-kt} \quad (7.6)$$

Avec :

Q_t et Q_0 , les débits aux instants t et t_0 (début du tarissement) exprimés en jours,

et k le coefficient de tarissement de Maillet dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension k .

La valeur de k est l'inverse du temps et s'exprime en jours^{-1} .

$$K = \frac{1}{T} \quad (7.7)$$

Il est généralement constant pour un même aquifère.

Le coefficient de tarissement k se déduit dans ce cas du logarithme de l'expression de l'équation 9.7 précédente comme suit (équation 7.8) :

$$K = \frac{\text{Log}Q_0 - \text{Log}Q_t}{0.4343t} \quad (7.8)$$

La courbe de tarissement se construit à partir des débits caractéristiques de la période sèche. Ces débits sont portés sur un graphique logarithmique de sorte que le temps est porté en abscisses et les débits en ordonnées. Le débit initial Q_0 doit correspondre au débit journalier le plus élevé de la période sèche proche des hautes eaux. Le pas de temps utilisé ici est de 10 jours. Le volume mobilisé, de la réserve hydrogéologique susceptible d'alimenter l'écoulement superficiel est déterminé par approche graphique à partir de la courbe de tarissement. Dans le cas contraire le calcul du volume d'eau mobilisé se fait à l'aide de l'équation 7.9 suivante :

$$V_{\text{Mobilisé}} = \frac{Q_0 (m^3 / s)}{k} \times 86400 (s.j^{-1}) = \int_0^{\infty} Q_0 e^{-kt} dt \quad (7.9)$$

Ainsi les courbes d'évolution des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés des bassins versants de Medjerda Méllègue ont été représentées sur les figures 7.8 et 7.9 pour permettre une étude comparée de leurs évolutions dans ces deux bassins et évaluer leur impact sur les ressources en eau.

7.4. 2. Analyse des courbes de tarissement

7.4. 2.1 Coefficient de tarissement et volume d'eau mobilisé par les aquifères

Cas de l'oued de la Medjerda

Les coefficients de tarissement de MAILLET sur la période 1969-2007 montrent de fortes fluctuations interannuelles (Figures 7.8 et 7.9). Pour l'oued de la Medjerda, les valeurs annuelles oscillent de $0,0105 \text{ j}^{-1}$ à $0,0210 \text{ j}^{-1}$ avant 1988-1989 et de $0,0117 \text{ j}^{-1}$ à $0,0108 \text{ j}^{-1}$ après cette date (Figure 7.8). Les valeurs moyennes sur ces deux périodes s'établissent à $0,0138 \text{ j}^{-1}$ et $0,0106 \text{ j}^{-1}$ respectivement. Dans les deux cas, la valeur obtenue traduit un tarissement rapide du cours d'eau. Mais la diminution des coefficients de tarissement après 1989 est la conséquence d'une recharge des aquifères. La valeur moyenne du volume d'eau mobilisé en phase de tarissement, qui atteint 39.54 hm^3 sur l'ensemble de la période d'observation, est à 35.25 hm^3 sur la période 1969-1988 et s'élève à 44.31 hm^3 sur la période 1989-2007, ce qui donne une augmentation de 22,92%, sur une superficie de 217 Km^2 . Les coefficients de tarissement les plus forts correspondent à de faibles volumes d'eau mobilisés et les plus faibles coefficients s'accompagnent de forts volumes d'eau mobilisés (Figure 7.8). Les réserves d'eau souterraine apparaissent relativement faibles de 1975 à 1989, 1993-1995, 1996 et 2001 alors que la recharge des nappes se révèle plus efficace de 2002 à 2005.

Les volumes mobilisés ont évolués inversement aux coefficients de tarissement. On note que ces volumes ont régulièrement baissés pendant l'année 1986 qui est caractérisée par une très faible pluviométrie. En effet l'année 1986 est l'année qui a été marquée par une sécheresse particulièrement intense dans la région d'étude. Cette sécheresse a contribué à réduire les réserves d'eau de la région et a même affecté la recharge souterraine ce qui a contribué à rendre les volumes mobilisés dans les différents bassins versants de la région. Les références (Bekkoussa B., 2008 ; Khettab, 2001; Khettab et al, 2002 ; Mebarki., 2010) ont également observé 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sècheresse hydrologique (faible hydraulicité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002. Ainsi, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'Ouest et du Centre se sont asséchés et moins ressentie à l'Est de l'Algérie, d'où la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus

difficile à gérer. En Tunisie aussi, les études effectuées sur la pluviométrie et les apports de l'oued Merguellil ont connu une baisse assez significative ces dernières décennies (Kingumbi, 2006). Et l'année 1988-1989 est aussi apparue dans plusieurs variables comme une année de rupture (Bergaoui et al, 2001; Kingumbi, 2006; Lahache et Pillet, 2008). Les coefficients de tarissement annuels de la rivière Méllègue varient de $0,00622 \text{ j}^{-1}$ à $0,028729 \text{ j}^{-1}$, pour des volumes d'eau mobilisés par les aquifères entre $0,86947116$ et $17,0440722 \text{ hm}^3$. En effet, le Méllègue qui couvre une superficie de 4575 Km^2 à Ouenza est l'un des principaux affluents de la Medjerda. Pour la Medjerda comme pour le Méllègue, les coefficients de tarissement les plus forts correspondent à de faibles volumes d'eau mobilisés et les plus faibles coefficients s'accompagnent de forts volumes d'eau mobilisés (Figures 7.8, 7.9).

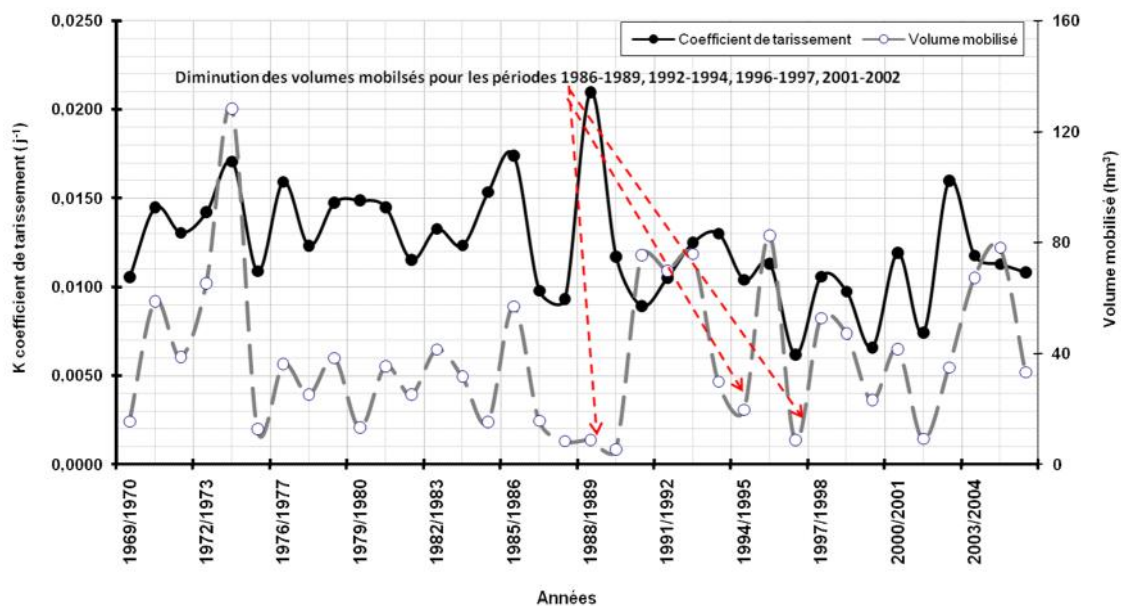


Figure 7.8 : Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé d'oued Medjerda.

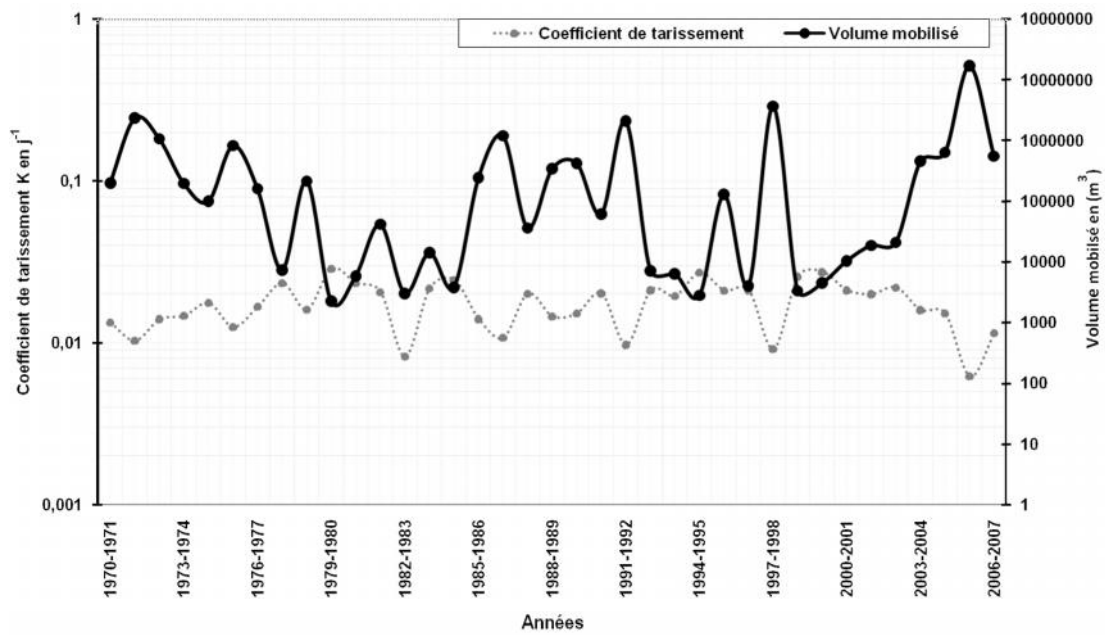


Figure 7.9 : Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé d'oued Méllègue.

Dans le cas du Méllègue, les réserves d'eau souterraine apparaissent relativement faibles de 1970 à 1994, alors que la recharge des nappes se révèle plus efficace de 1995 à 2007. Les coefficients de tarissement moyens pour ces deux périodes s'établissent respectivement à $0,01715 \text{ j}^{-1}$ et $0,01875 \text{ j}^{-1}$. Les volumes d'eau mobilisés sont faibles pendant la période sèche ($400375,77 \text{ m}^3$ en moyenne) et plus élevés sur la période 1995-2007 ($1735493,44 \text{ m}^3$ en moyenne), pour une superficie de 4575 Km^2 . La lente réaction de ces bassins versants au tarissement met en évidence la très grande perméabilité de ces aquifères et leur aptitude à restituer les eaux souterraines accumulées au cours des saisons pluvieuses. Ce qui montre que pendant les saisons sèches dans la vallée de Méllègue se sont les nappes souterraines qui alimentent les cours d'eau en surface.

7.5. Conclusion

La variabilité des paramètres climatiques dans la région de l'oued de la Medjerda a contribué à réduire les ressources en eau disponibles pendant les périodes de déficit pluviométrique (période de sécheresse). Cette variabilité a eu des conséquences néfastes sur le bilan hydrologique et a affecté la recharge souterraine réduisant ainsi les disponibilités en eau des réserves de la région. Ainsi, les coefficients de tarissement ont connue une baisse ces dernières années inversement aux volumes mobilisés dans les bassins versants de la région.

Ces résultats ont un avantage vers une reprise d'augmenter la recharge souterraine et par conséquent, les disponibilités en eau des réserves de la région. Les observations faites en (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014) confirment aussi la prédominance de conditions plus humides, puisque le ministère de l'agriculture algérien a annoncé pour l'année 2010, une production céréalière record de 62 millions de quintaux, un chiffre jamais atteint par l'agriculture algérienne. Les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état aussi d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % sur ces dernières années. Parallèlement à cette tendance, on note aussi une nette recrudescence des pluies orageuses dans presque la totalité des stations. Les pluies qui s'abattent sur le territoire algérien sont ainsi devenues plus intenses, cet argument est d'ailleurs conforté par une augmentation sans précédent des inondations et des crues dévastatrices dans le pays (Zeineddine., 2011 ; Benazzouz., 2011). Le retour des pluies de la dernière décennie est une chance pour les agricultures, il n'en est pas de même pour les citoyens. En effet, les fortes averses provoquent des inondations et causent de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines. Les pluies, qui avaient été tant attendues, sont ainsi devenues de plus en plus redoutées.

Chapitre 8

Concepts des modèles probabilistes pour le bassin d'oued Medjerda

8.1. Introduction

Après ces longues sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, la très grande variabilité des pluies: années sèches et humides s'alternent, par des pluies souvent intenses générant des crues dévastatrices (Meddi, 2009; Mebarkie, 2010; Zinne Eddine, 2011). Et le changement de la variabilité climatique des dernières décennies (1980-1990-2000) a produit dans la région d'oued Medjerda des pluies plus fréquentes, de courtes durées et d'intensités élevées pendant l'été, avec une irrégularité des pluies d'hiver. Celles-ci sont caractérisées par une pluie d'intensité moyenne, et de longue durée moins critique que les orages d'été. Un exemple a eu lieu le 22 Août 2002 où un orage violent s'est abattu sur la ville de Souk-Ahras en 13 minutes occasionnant des inondations, la mort de 2 personnes, et plusieurs dégâts matériels (O.N.M., 2008; lamétéo.org, 2008).

Afin de mieux comprendre la réaction du bassin versant vis-à-vis des séquences pluvieuses, nous devons aborder le caractère exceptionnel du phénomène au pas journalier. Dans cette étude, nous disposons des pluies jour par jour sur une période de 12960 valeurs (station de Souk-Ahras). L'estimation de l'intensité moyenne maximale, demeure l'élément essentiel dans l'étude des crues et la gestion des eaux du bassin versant.

8.2. Distribution statistique des pluies extrêmes

De nombreuses lois sont proposées pour les pluies extrêmes. Dans la pratique, celle qui est la plus utilisée et qui est aussi admise universellement en tant que règle des extrêmes (précipitations maximales annuelles ou mensuelles, débits maximaux annuels, températures maximales ou minimales, etc.) est la loi de Gumbel.

La distribution de cette loi s'exprime de la manière suivante (Meylan et Musy, A., 1998) :

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{1/c}\right) \quad (8.1)$$

où a : est le paramètre de position, b : le paramètre d'échelle et c : le paramètre de forme.

La fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \quad (8.2)$$

Posons la variable réduite suivante :

$$U = \frac{x-a}{b} \quad (8.3)$$

La distribution s'écrit alors comme suit :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u)) \quad (8.4)$$

et

$$u = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (8.5)$$

L'avantage d'utiliser la variable réduite est que l'expression d'un quantile est alors linéaire. En effet pour trouver la valeur x_q d'un quantile, correspondant à la distribution $F(x_q) = q$, en fonction des deux paramètres a et b , il suffit d'utiliser la relation suivante :

$$X_q = a + b u_q \quad (8.6)$$

Les deux premiers moments théoriques de la loi de Gumbel s'expriment à partir des paramètres de position et d'échelle de la manière suivante :

$$\begin{cases} \mu = a + b\gamma \\ \sigma^2 = \frac{\pi^2}{6} b^2 \end{cases} \quad (8.7)$$

Avec $\gamma = 0.5772$ constante d'Euler, σ : l'écart type des valeurs composantes l'échantillon et μ : la moyenne de l'échantillon.

On obtient donc les formules suivantes pour l'estimation par la méthode des moments:

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sqrt{6}}{\hat{\sigma}} \pm \\ \hat{a} = \hat{\mu} - \hat{b} \hat{\sigma} \end{cases} \quad (8.8)$$

Nous remarquons que les pluies journalières maximales extrêmes observées à Souk-Ahras sont bien ajustées au modèle de Gumbel (Figure 8.1).

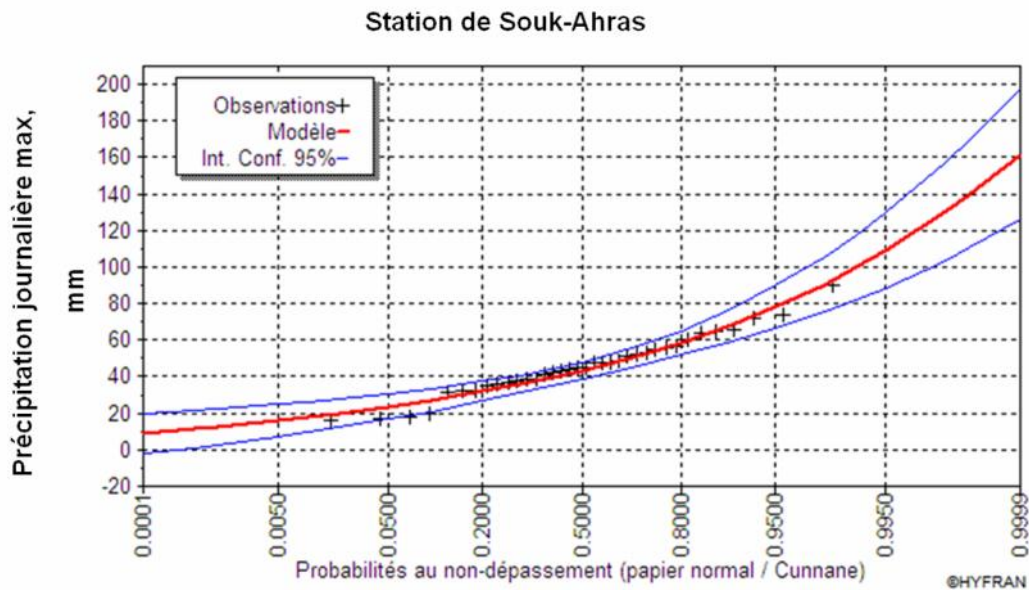


Figure 8.1 : Ajustement de loi de Gumbel aux maxima annuels des pluies journalières de Souk-Ahras.

Après cet ajustement la loi est soumise au test d'adéquation non paramétrique de χ^2 , ce test s'est révélé concluant pour cette série de données pluviométriques journalières maximales au niveau de signification de 5 %. Le tableau (8.1) résume les caractéristiques de base de la loi et du test de χ^2 de l'échantillon.

8.3. Estimation des probabilités des événements hydrologiques

L'estimation fréquentielle des pluies journalières maximales annuelles (à plus haut risque) dans cette étape d'étude montre que : les pluies extrêmes dans cette zone d'étude varient entre 59 mm à 85 mm pour les décennales, 87 mm à 130 mm pour celles de fréquence centennale. L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le Tableau (8.1). Ces pluies sont relativement sévères au réseau d'assainissement. Leurs impacts sont très sérieux, à savoir : inondation et perte de propriété, fermeture et dérangement de la circulation, perte des vies

humaines, débordement des eaux usées sur les routes engendrant un risque élevé pour la santé.

Tableau 8.1 : Estimation des pluies journalières maximales annuelles fréquentielles (à 95 % de chance).

Récurrences T (ans)	Fréquence (f %)	Variable réduite de Gumbel (U)	P_f % (mm)	I_C 95% ($U_{f\ 95\%}=1.96$)
Médiane (2ans)	0.5	0.36	41.38	± 6.979 34.41<41.38<48.35
Décennales (10 ans)	0.9	2.25	71.94	± 12.70 59.24<71.94<84.64
Quinquennales (50 ans)	0.98	3.9	98.62	± 19.84 78.78<98.62<118.46
Centennale (100ans)	0.99	4.6	109.94	± 23 86.94<109.94<132.94

Le Tableau (8.2) montre les temps de retour pour les hauteurs des pluies journalières maximales des années 1983-1984 et 1990-1991, 2002-2003

Tableau 8.2 : Les temps de retour des pluies journalières maximales des années 1983-1984 et 1990-1991, 2002-2003, Souk-Ahras.

Année	Pluie (mm)	Variable réduite de Gumbel (U)	Probabilité de non dépassement $F(x_i)$	Période de retour $T(\text{ans})=1/(1-F(x_i))$
1983-84	74.4	2.39	0.91	12
1990-91	72.0	2.24	0.90	10
2002-2003	90.5	4.01	0.98	50

8.4. Les pluies torrentielles en saison humide (de Septembre à Avril)

Ces pluies sont issues des phénomènes frontaux plus généraux et à large répartition spatiale. Dans la région d'oued Medjerda, le dimensionnement des systèmes hydrauliques est basé généralement sur les pluies d'hiver caractérisées par une pluie d'intensité moyenne et de longue durée.

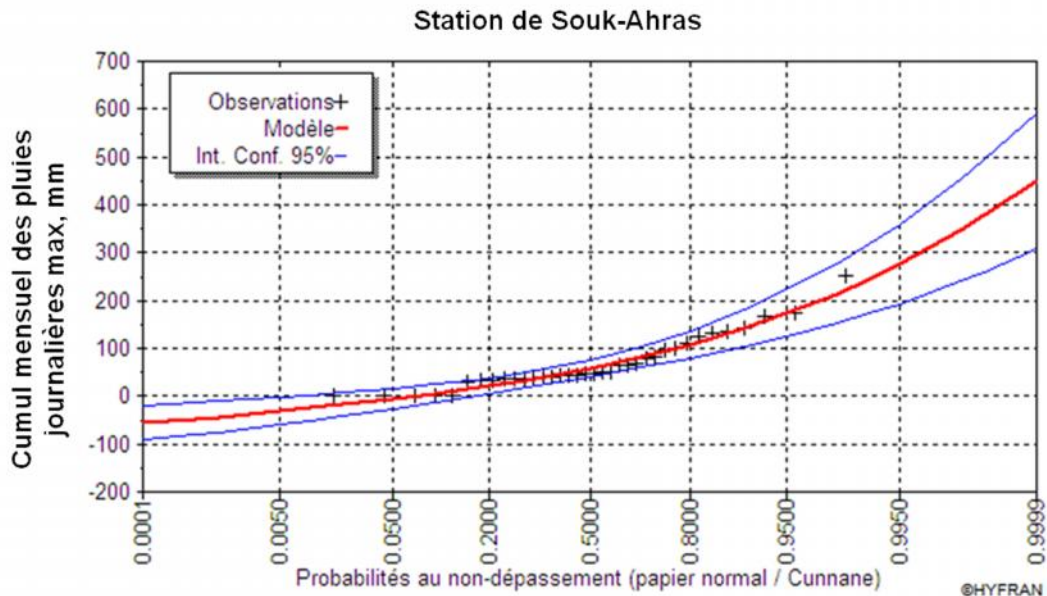


Figure 8.2 : Ajustement de loi de Gumbel aux cumuls des pluies journalières mensuelles torrentielles (saison humide).

Tableau 8.3 : Estimation du cumul des pluies journalières mensuelles torrentielles annuelles fréquentielles (à 95 % de chance) saison humide.

Récurrences T (ans)	Fréquence (f %)	Variable réduite de Gumbel (U)	P_f % (mm)	I_C 95% (U_f 95 % =1.96)
Médiane (2ans)	0.50	0.36	88.30	± 19.9 $68.4 < 88.3 < 108.2$
Décennales (10 ans)	0.90	2.25	195.16	± 34.73 $160 < 195.16 < 230$
Quinquennales (50 ans)	0.98	3.90	288.45	± 54.22 $234.23 < 288.45 < 342.67$
Centennale (100ans)	0.99	4.60	328.00	± 62.89 $265.11 < 328 < 390.89$

Cette étape d'étude montre que le cumul mensuel des pluies torrentielles en saison humide dans cette zone d'étude varie entre 160 mm à 230 mm pour les pluies décennales et de 265 mm à 391 mm pour les pluies de fréquence centennale le tableau (8.3) ci-dessus présente l'ensemble de ces résultats.

8.5. Les pluies torrentielles en saison sèche (de Mai à Août)

Ces pluies sont issues des phénomènes convectifs, qui se caractérisent par une extension spatiale plus limitée. L'étude montre que le cumul des pluies torrentielles en saison sèche varie entre 52 mm à 82 mm pour les pluies décennales et de 97 mm à 150 mm pour les pluies

de fréquence centennale (Tableau 8.4). Ces pluies peuvent causer des dégâts sur l'agriculture notamment pendant la période des récoltes, et peuvent, exercer un effet plus grand sur la genèse et la propagation des crues.

Tableau 8.4 : Estimation du cumul des pluies journalières mensuelles torrentielles annuelles fréquentielles (à 95 % de chance) saison sèche.

Réurrences T (ans)	Fréquence (f)	Variable réduite de Gumbel (U)	$P_f\%$ (mm)	I_C 95% ($U_{f\ 95\%}=1.96$)
Médiane (2ans)	0.50	0.36	22.36	± 8 $14.36 < 22.36 < 30.36$
Décennales (10 ans)	0.90	2.25	67.22	± 14.56 $52.66 < 67.22 < 81.78$
Quinquennales (50 ans)	0.98	3.90	106.37	± 22.74 $83.63 < 106.37 < 129.11$
Centennale (100ans)	0.99	4.60	122.98	± 26.4 $96.58 < 122.98 < 149.38$

8.6. Analyse intensité – durée – fréquence : loi de Montana

Aborder les problèmes hydrologiques ou leurs conséquences revient tout simplement à réfléchir sur les deux formes extrêmes de l'écoulement : l'étiage et les crues. La première conduit à une utilisation rationnelle de l'eau en vue d'éviter son gaspillage. La deuxième concerne les crues. L'absence des stations pluviométriques et hydrométriques à caractère professionnel pose le problème des données et de leur utilisation dans des domaines aussi prioritaires que l'hydrologie et l'agriculture. L'analyse des données pluviométriques relève de deux catégories: le dépouillement des hyètoigrammes inexistantes dans la plupart des cas relatifs aux pluies de courte durée inférieure à 5 h et celui relatif aux données plus fréquentes dans les stations et concernant les pluies longues durée supérieure à 5 h.

8.6.1. Les Pluies de longues durées

Nous sommes amené assez souvent à utiliser les relevés journaliers afin d'établir les courbes caractéristiques de la pluviométrie, beaucoup plus faciles à exploiter. Une pluie de durée donnée se définit par la hauteur d'eau tombée et la fréquence d'apparition d'une telle hauteur. Il est à remarquer qu'il est possible de remplacer la hauteur d'eau par son intensité moyenne maximale, qui est un paramètre déterminant dans l'estimation du débit de crue à évacuer. Le dépouillement d'une série de pluies journalières permet la constitution des courbes "hauteur-durée-fréquence", qui ne sont qu'un ajustement à une fonction exponentielle appelée loi de Montana :

$$h = at^n \quad (8.9)$$

où h : hauteur de pluie (mm), t : durée (h), a et n : paramètres (sans unités).

L'anamorphose logarithmique permet le passage à un modèle linéaire plus maniable et facile à exploiter (Figure 8.3).

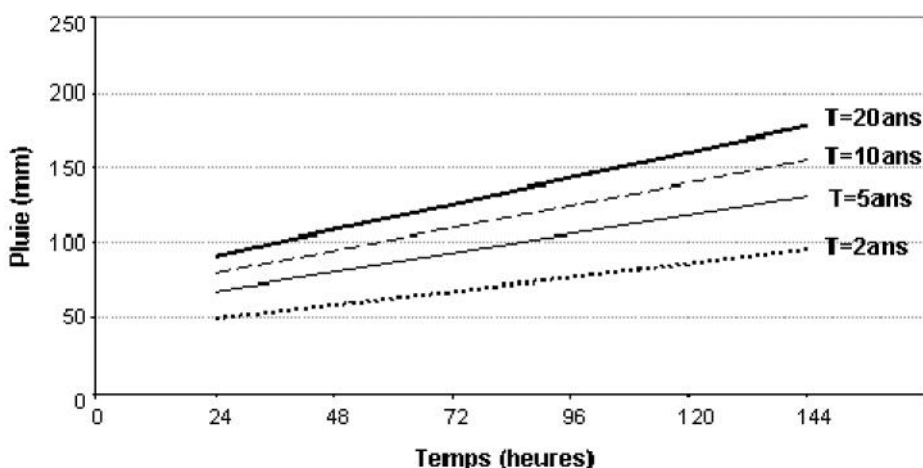


Figure 8.3 : Hauteur de pluie en fonction de la durée pour une période de retour donnée ; anamorphose de la loi de Montana ($h=at^n$) en une fonction affine ($\log h = \log a + n \log t$), années 1969-2005

Tableau 8.5: Estimation des paramètres a et n à partir des droites de régression.						
Période de retour (ans)	2	5	10	20	50	100
Valeur de n	0.49	0.55	0.57	0.59	0.62	0.63
Valeur de a	9.21	10.15	11.10	11.82	12.41	13.23

La transformation des courbes "hauteur- durée- fréquence" en courbes "intensité – durée - fréquence" est indispensable pour la mesure. L'objectif recherché reste l'estimation du débit de crue ou l'intensité est un paramètre déterminant. Il y a à ce sujet une loi qui fait l'unanimité de tous les hydrologues (bien qu'elle soit empirique) : c'est la loi de Turazza. Elle consiste à admettre que le débit maximum à craindre à l'exutoire d'un bassin versant est atteint lorsque la durée de la pluie est égale au moins au temps de concentration. Le débit maximum à craindre à la sortie du bassin versant est exprimé par la relation :

$$Q_m = \frac{r \times i}{0.36} \times S \quad (8.10)$$

où Q_m : débit maximum (l /s), r : coefficient de ruissellement instantané, i : l'intensité moyenne maximale de la pluie critique (mm /h), S : la surface du bassin (ha). L'intensité moyenne maximale de la pluie critique correspond à une période de retour choisie selon les risques à encourir, dont la durée serait égale au moins au temps de concentration. La détermination des paramètres de la fonction (a et n) à partir des droites de régression (droites de Montana) rend facile la construction des courbes "intensité- durée- fréquence". L'intensité moyenne maximale, i_m en mm h-1, (Figure 10.4) est donnée par la relation suivante:

$$i_m = at^{(n-1)} \quad (8.11)$$

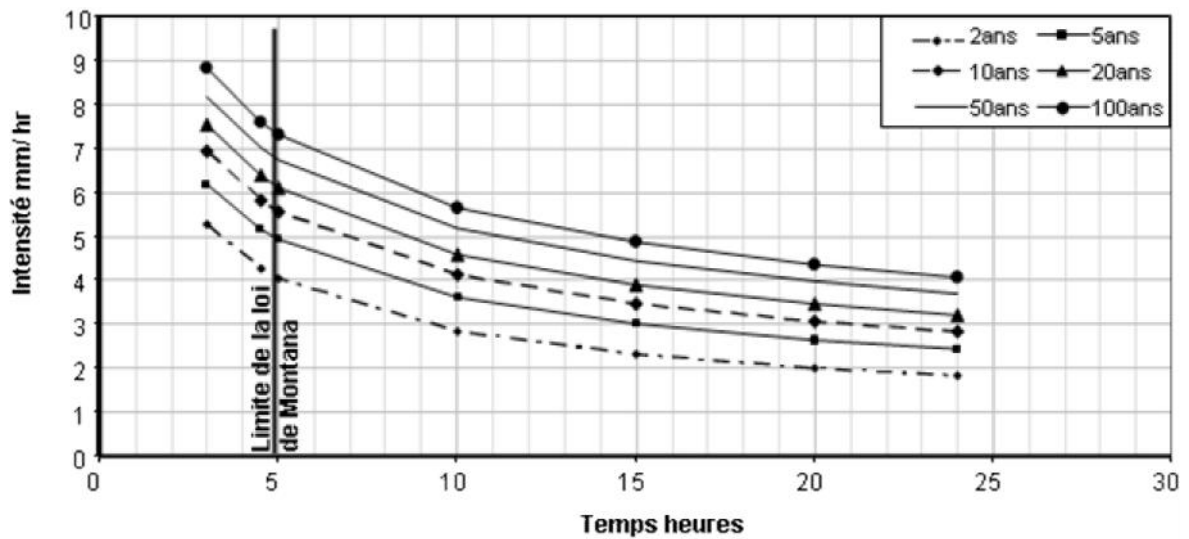


Figure 8.4 : Courbes-Intensités-Durées-Fréquences loi de Montana

8.6.2. Les Pluies de courtes durées

L'application de la loi de Montana reste satisfaisante pour les pluies de longue durée. Mais, en matière d'hydrologie, nous avons affaire dans la plupart des cas à des petits bassins versants allongés et dont l'hydrogramme de crue correspond à un rectangle (Gaspar, 1971). La région de Souk-Ahras est caractérisée par un relief accidenté avec des pentes très fortes, ce qui nous amène le plus souvent à avoir des temps de concentration inférieurs à 5 h. Les pluies de courte durée, en l'absence d'hydrogramme, ne peuvent être déterminées que par les procédés statistiques. Suivant le type de données pluviométriques existant, les pluies maximales journalières de fréquence voulue peuvent être déterminées : lorsque les données pluviométriques concernant les pluies maximales journalières existent. Il est possible alors d'en déduire les fréquences correspondantes en ajustant tout simplement des lois statistiques connues; c'est le cas des données de Souk-Ahras ajustées par une loi de Gumbel (Figure 8.1).

Une fois déterminer les pluies journalières maximales pour chaque fréquence, la démarche consiste à en déduire les pluies de courte durée en fonction des pluies maximales calculées précédemment, $P_{j\%}$, de la durée, t , et d'un exposant climatique, b . De ce fait, la pluie de durée t et de fréquence voulue, devient :

$$P_{t\%} = P_{j\%} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad (8.12)$$

où P : pluie en mm, t : temps en heure.

La finalité de cette méthode reste la satisfaction d'une demande insistante pour la conception des ouvrages hydro agricoles auxquels les milieux rural et urbain sont confrontés dans la région de Souk-Ahras par suite d'une couverture insuffisante en stations météorologiques et hydrométriques. La connaissance des pluies de courte durée nous permet (Figure 8.5), pour une fréquence donnée, de passer aisément aux intensités ajustées à une fonction hyperbolique du type

$$i_m = \frac{a}{(b + t)} \quad (8.13)$$

avec i_m en mm h⁻¹, t en min, a et b les paramètres des pluies longues et courtes, respectivement. L'équation (8.13) a été proposée par Talbot. Le recours aux méthodes classiques constitue, à coup sûr, à un palliatif incontournable pour résoudre les problèmes posés dans les zones où les données pluviométriques sont rares (Belloum, 1991).

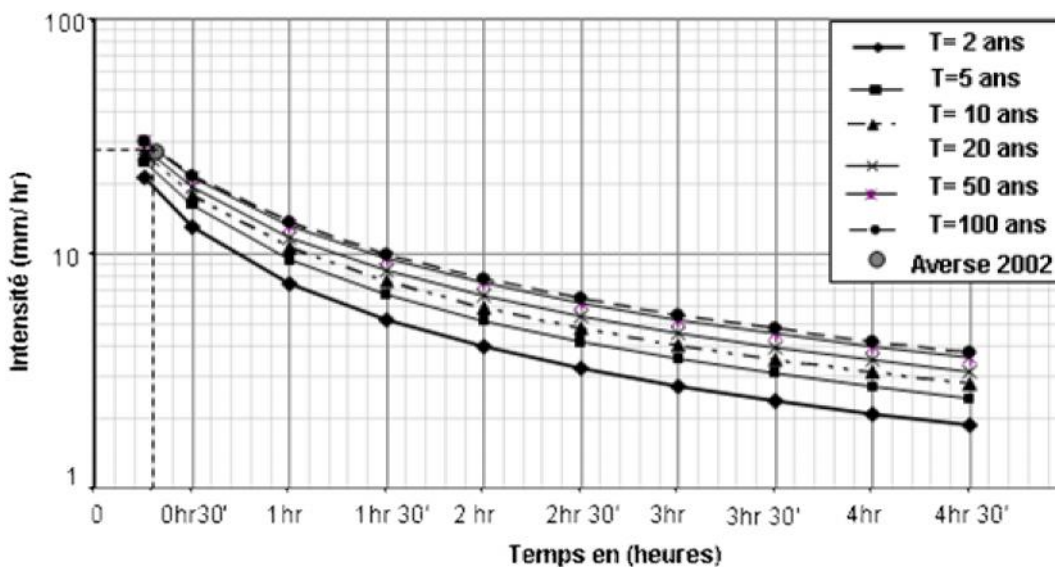


Figure 8.5: Courbes-Intensités-Durées-Fréquences pluies de courte durée.

8.6.3. Application à l'événement pluvieux du 22 Août 2002 à Souk-Ahras

En utilisant les courbes IDF de la région d'étude (Figure 8.5) on peut conclure que cet événement a une période de retour de 50 ans.

8.7. Conclusion

L'analyse des données pluviométriques journalières montre que :

1. Les pluies extrêmes de la station de Souk-Ahras s'ajustent bien à la loi de Gumbel.
2. L'analyse statistique des pluies fortes nécessite la réalisation d'un découpage saisonnier :
 - a. Les pluies fortes en saison humide (de Septembre à Avril) et qui sont issues des phénomènes frontaux plus généraux et à large répartition spatiale. Cette étape d'étude fait apparaître que le cumul mensuel des pluies torrentielles dans cette zone d'étude varie entre 160 mm à 230 mm pour les pluies décennales et 265 mm à 391 mm pour les pluies de fréquence centennale.
 - b. Les pluies issues des systèmes convectifs en saison sèche (de Mai à Août) se caractérisent par une extension spatiale plus limitée. Cette étape d'étude montre que le cumul mensuel des pluies fortes dans cette zone d'étude varie entre 52 mm à 82 mm pour les pluies décennales et 97 mm à 150 mm pour les pluies de fréquence centennale.

Pour finaliser notre travail de recherche, nous avons établie pour la région d'Oued Medjerda des courbes IDF. Ces modèles seront utilisés dans la conception des ouvrages hydrauliques, afin de mieux gérer la gestion des eaux des bassins versants de cette zone, de prévenir des situations à risque tel que l'inondation, et protéger l'agriculture des dégâts en période de récolte.

Chapitre 9

Conclusions et Recommandations

Cette étude a permis de tirer les conclusions et recommandations suivantes :

9.1. Conclusions

L'étude de la variabilité des précipitations à partir des totaux annuels, et des méthodes (quintile et analyse fréquentielle, Chaines de Markov) menée sur les stations représentatives du bassin de la Medjerda (Souk-Ahras, Ouenza et Tébessa), a mis en évidence :

- La succession de deux phases déficitaires, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé début des années 80 et qui persiste dans les années 90 est principalement occasionnée par une baisse des pluies du printemps et plus particulièrement celles de l'hiver.
- L'étude par les chaines de Markov dans la zone d'étude a montré que la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent une année, deux années de suite, voire trois années ou plus. La probabilité d'avoir deux années sèches consécutives est plus importante dans les régions du Nord et du Sud, régions qui participent d'une façon considérable à la production agricole du bassin d'étude. Ces résultats pourront aider à établir une stratégie de lutte contre la sécheresse.

Une explication de ces processus est à rechercher dans les situations météorologiques et leur fréquence d'apparition, dans le sens de rotation des vents dans les perturbations, dans l'orientation et l'exposition aux vents pluvieux ainsi que dans l'état de la circulation atmosphérique (jet stream) en altitude.

Et à la lumière de nos résultats à partir du tableau de contingence et l'évolution de la fréquence des années humides et très humides entre l'oscillation Nord Atlantique et la

pluviométrie dans notre région d'étude, on peut dire qu'il y a un lien. Cette dernière oscillation cyclique, dont la portée fait encore débat, pourrait expliquer la variabilité des précipitations dans une grande partie de la zone méditerranéenne et étayer l'hypothèse de la fin des années de sécheresse dans cette zone. Mais il faut avoir à l'esprit que la pluviométrie n'est pas expliquée uniquement par ce facteur mais elle est influencée par beaucoup de facteurs climatiques.

L'analyse de la caractérisation de la variabilité climatique du site d'étude montre que :

- Les chroniques des séries pluviométriques de la période d'étude 1969-2007 ne sont pas stationnaires, et que la majorité des ruptures se localisent dans les décennies 80 et 90. À l'échelle mensuelle, on constate une très grande irrégularité mensuelle après les dates de rupture des décennies 80 et 90. On observe une augmentation des pluies du début d'hiver et du printemps avec un déficit du mois de mars et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août.
- Une tendance à la hausse du cumul de pluies supérieures à 20 mm (considérées comme les fortes pluies) se dessine à partir des années de rupture. Aux variations temporelles, s'ajoutent les variations spatiales des précipitations. Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin. La décennie 1971-1980 se distingue par une alternance de zones excédentaires et déficitaires. Les décennies 1981-1990 et 1991-2000 apparaissent comme déficitaires. La dernière décennie (2001-2007) apparaît comme excédentaire. Le bassin connaît une diminution pluviométrique au total avec une augmentation des pluies estivales, et une hausse régulière des variations interannuelles de la température de l'air pourrait être derrière la prédominance des ces orages sur ces dernières décennies, mais elle ne peut pas expliquer à elle seule ce changement.

Les résultats de l'évolution du régime hydrologique de la Medjerda montre que :

- Nos bassins versants ont un régime pluvial méditerranéen caractérisé par une forte irrégularité. Toutefois, les fluctuations hydro climatiques observées sur d'aussi longues périodes (1968-2007 pour le bassin de la Medjerda au Nord et 1969-2007 pour le bassin de Mèllègue) peuvent être généralisées à l'ensemble des stations des deux bassins.
- Une persistance de l'alternance d'épisodes humides et secs, avant 1973. Après 1973, on peut distinguer une nette décroissance continue des débits moyens qui atteint son

paroxysme de 1992 à 1996. Une augmentation des débits moyens est observée vers la fin de la décennie 90 pour le bassin d'étude.

- Par conséquent, les déficits pluviométriques et hydrologiques peuvent renforcer l'écart entre les besoins importants en eau d'une population sans cesse croissante et les ressources hydriques pouvant être mobilisées.

L'impact de la variabilité des paramètres climatiques dans la zone de l'oued de la Medjerda a contribué à :

- L'évolution de l'évapotranspiration de référence et de la température est inverse par rapport à celle de la pluviométrie. L'augmentation de la température influe négativement sur la disponibilité des ressources en eau de la zone d'étude. Cette influence se traduit par l'augmentation des pertes par évaporation ;
- Les périodes de déficit hydrique sont observées au niveau de l'oued Medjerda à la même date de la succession des années de sécheresse ;
- Réduction des ressources en eau disponibles pendant les périodes de déficit pluviométrique (période de sécheresse). Cette variabilité a eu des conséquences néfastes sur le bilan hydrologique et a affecté la recharge souterraine réduisant ainsi les disponibilités en eau des réserves de la zone ;
- Ainsi, les coefficients de tarissement ont connu une baisse ces dernières années inversement aux volumes mobilisés dans les bassins versants de la zone. Ces résultats ont un avantage vers une reprise d'augmenter la recharge souterraine et par conséquent, les disponibilités en eau des réserves de la zone.

Les observations faites en (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014) confirment aussi la prédominance de conditions plus humides, puisque le ministère de l'agriculture algérien a annoncé pour l'année 2010, une production céréalière record de 62 millions de quintaux, un chiffre jamais atteint par l'agriculture algérienne. Les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état aussi d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % sur ces dernières années. Parallèlement à cette tendance, on note aussi une nette recrudescence des pluies orageuses dans presque la totalité des stations. Les pluies qui s'abattent sur le territoire algérien sont ainsi devenues plus intenses, cet argument est d'ailleurs conforté par une augmentation sans précédent des inondations et des crues dévastatrices dans le pays (Zeineddine., 2011 ; Benazzouz., 2011). Le retour des pluies de la dernière décennie est une chance pour les agricultures, il n'en est pas de même pour les citadins. En effet, les fortes

averses provoquent des inondations et causent de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines. Les pluies, qui avaient été tant attendues, sont ainsi devenues de plus en plus redoutées.

Pour finaliser notre travail de recherche, nous avons établie pour zone d'Oued Medjerda des courbes IDF. Ces modèles seront utilisés dans la conception des ouvrages hydrauliques, afin de mieux gérer la gestion des eaux des bassins versants de cette zone, de prévenir des situations à risque tel que l'inondation, et protéger l'agriculture des dégâts en période de récolte.

9.2. Recommandations

Les travaux de recherche sont en cours pour élargir la base de données couvrant plus le territoire Algérien pour une meilleure analyse et gestion des extrêmes hydrologiques et une régionalisation des résultats trouvés. Et aussi, en incluant d'autres stations de mesure entre l'Europe du sud et l'Afrique du Nord rive sud méditerranéenne, entreprendre la régionalisation, et caractériser le changement de la variabilité climatique en terme de quantification probabiliste des précipitations, et évaluer l'impact sur les ressources en eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. 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 Niño/La Niña).Sécheresse, 10(4), pp 245- 252.
- [2]. Amoussou E., Oyede L. M., et Boko M., 2006: Variabilité pluvio-hydrologique et production agricole dans le bassin du Couffo au Bénin (Afrique de L'Ouest). XIXe colloque de l'association Internationale de climatologie, les risques liés au temps et au climat, Eparnay, 6-9 septembre, France, p. 67-72.
- [3]. Albergel J., 1986 : Évaluation de la pluviométrie en Afrique Soudano-Sahélienne exemple du Burkina-Faso. In : Colloque CIEH sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse (Ouagadougou), 19 p.
- [4]. Amraoui L., Adama Sarr M. et Soto D., 2011 : Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest. Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, vol. V, p. 125-142. URL :<http://physio-geo.revues.org>.
- [5]. A.N.R.H., 1993 : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une notice de 49 p), Ministère de l'Équipement, Alger, Ed. I.N.C.
- [6]. Ake G-E., 2010 :“Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire),” Thèse Unique, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 200 p.
- [7]. Arnaud M. Contribution à l'étude stochastique markovienne des précipitations dans le bassin Adour-Garonne. Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut national polytechnique de Toulouse, octobre 1985.
- [8]. Amyay M., Nouaceur Z., Tribak A., Obda k.H. et Taous A., 2012 : Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes dans le moyen Atlas marocain et ses marges. In : Actes du XXVème colloque international de climatologie (Grenoble), p. 75-80.
- [9]. Ardoin-Bardin S., 2004 : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440p.

- [10]. Blöchliger H., & Neidhöfer F., 1998 : Impacts des précipitations extrêmes, Rapport de l'orange consultatif en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques, pp 40.
- [11]. Belloum A., 1991: Maîtrise, gestion et utilisation de l'eau en agriculture. Thèse de Doctorat de l'université de Bordeaux, pp200.
- [12]. Bergaoui. M et al., 2001: Caractérisation de la sécheresse météorologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. Rev. Sécheresse. Vol. 12 n°4. p. 205-213.
- [13]. Bergaoui Z., 1983 : Contribution à l'étude statistique de la pluie dans la région de Tunis. Thèse présentée à l'institut nationale polytechnique de Toulouse. 134 pp.
- [14]. Benzarti Z. et Habaieb H., 2001 : Etude de la persistance de la sècheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909- 1996). Sciences et changements planétaires, Sécheresse. Vol 12 (4), 215-20, Notes méthodologiques.
- [15]. Bekkoussa B., Meddi M. et Jourde H., 2008 : Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : le cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). Sécheresse, vol. 19, n° 3, p. 173-184.
- [16]. Benazzouz A., 2011 : Conférence sur les inondations majeures en Algérie, Séminaire International UVREDA, Utilisation et valorisation des ressources en eau pour le développement durable des écosystèmes arides, Centre de Recherche Scientifique et technique sur les Régions Arides, Biskra, 13-14 novembre.
- [17]. Beran A, Rodier A., 1987 : Aspects hydrologiques des sécheresses contribution au programme hydrologique international. Rapport préparé par un comité mixte UNESCO/OMM. Paris : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 172 p.
- [18]. Beersma J. et Buishand A., 2004: Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, Water Resour. Res., 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- [19]. Buishand T.A., 1982: Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, vol. 58, p. 11-27.
- [20]. Buishand T.A., 1984: Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. Journal of Hydrology, vol. 73, p. 51-69.

- [21]. Brunet-Moret Y., 1971 : Etude de l'homogénéité des séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. Cah. O.R.S.T.O.M., série Hydrologie, Vol. VIII (4) 3-31.
- [22].Bossy D., 2013 : La mousson en Inde est-elle exceptionnelle en 2013. Futura Sciences, URL : <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/actu/d/meteorologie-mousson-inde-elle-exceptionnelle-2013-47361/>
- [23]. Bello N.J., 1998: Evidence of climate change based on rainfall records in Nigeria. Weather, 52(12), pp 412-418.
- [24]. Bekkoussa B., Meddi M. et Jourde H., 2008 : Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : le cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). Sécheresse, vol. 19, n° 3, p. 173-184.
- [25]. Bendjoudi H., Hubert P., Schertzer D., 1998: Indépendance d'échelle de la distribution statistique des précipitations extrêmes, International Hydrological Program (IHP-V), Technical Document in Hydrology, n° 20, Unesco, Paris.
- [26]. Christensen JH., Hewitson B., Busuijac A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kollir.K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mears L., Menéndez C.G., J. Räisänen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P., 2007: **Chapter 11:** Regional climate projections. In : Climate change 2007: the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 847-940. URL : <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter11.pdf>
- [27]. Chaumont M., & Paquin C., 1971 : Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000. Alger : Soc. Hist. Afri. Nord.
- [28]. Cassou C., 2004 : Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. La Météorologie, n° 45, p. 21-32. DOI : [10.4267/2042/36039](https://doi.org/10.4267/2042/36039)
- [29].Cantat O., 2004 : Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20^{ème} siècle en Basse- Normandie : Réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. Annales de l'Association Internationale de Climatologie, Vol I, 11, p. 13-31.

- [30]. Chaîne Météo, 2013 : Crues et inondations historiques : l'Europe centrale sous l'eau. URL: <http://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2013-06-11-00h00/cruet-et-inondations-historiques---l-europe-centrale-sous-l-eau-21278.php>
- [31]. Cavadias Georges, 1994 : Detection and Modelling of the impact of climatic change on river flows. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, pp 207-218.
- [32]. Duplessy J.C., 2001 : État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des planètes, vol. 333, p. 765-773.
- [33]. Douguédroit A. et Bridier S., 2007 : Réchauffement climatique et évolution de l'environnement des stations en région méditerranéenne française (1951-2000). In : Climat, tourisme, environnement, Actes du XX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie), H. BEN BOUBAKER édit., p. 204-209.
- [34]. Dacosta H., 1989 : Précipitation et écoulements sur le Bassin de la Casamance. Thèse de 3^{ème} cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 278 p.
- [35]. Djellouli Y., & Daget P., 1993 : Conséquences de la sécheresse des deux dernières décennies sur les écosystèmes naturels algériens, Publication Association International Climatologique, 6, pp105-14.
- [36]. Dallel J. et Sakka M., 2010 : Pluviométrie en Méditerranée occidentale et oscillation nord-atlantique (NAO). In : Risques et changement climatique...en hommage à Jean MOUNIER, Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Rennes), p. 501-507.
- [37]. D:\doc\Lameteo_org la météo dans tous ses états.mht, 2008.
- [38]. Duby C. et Robin S., 2006 : Analyse en composantes principales. Institut National Agronomique. Département O.M.I.P, Paris, Grignon. 53p.
- [39]. Dutot L., Elichegaray C., et Vie le sage, R., 1983 : Application de l'analyse des correspondances à l'étude de la composition physico-chimique de l'aérosol urbain. Atmospheric Environment, 17 (1), 73 – 78.

- [40]. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007: Rapport 2001 et 2007 sur l'évolution du climat. Genève. 20p.
- [41]. GIEC, 2008 : Changements climatiques et impacts dans les Alpes. Résultats du WP5 du projet Clim Ch Alp. Rapport Technique N°1 de l'ONERC, France.
- [42]. Gautier E-F., 1910 : Profils en long des cours d'eau en Algérie-Tunisie, Annales de Géographie, XX, p. 351-366 et 431-447.
- [43]. Gaspar S., 1971: Evaluation des débits de crue de petits bassins versants ruraux en Belgique. Thèse de Doctorat, Université de Gembloux.
- [44]. Hubert P., Servat E., Paturel J., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P et Lubes-Niel H., 1998: La procédure de segmentation, dix ans après. Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century. IAHS Publication 252, pp267-273.
- [45]. Heinz W., 2004 : Institut de géographie climatologie et météorologie, Université de Berne.
- [46]. Henia L., Benzarti Z., 2006 : Changements climatiques et ressources en eau de la Tunisie. XIXe colloque de l'association Internationale de climatologie, les risques liés au temps et au climat, Eparnay, 6-9 septembre, France, p. 15-20.
- [47]. Hénia L., 1993 : Climat et bilans de l'eau en Tunisie, essai de régionalisations climatiques par les bilans hydriques. Tunis : Publications de la Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 391 p.
- [48]. Hoff C., Rambal S., 1999 : Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques, CEFE / CNRS, Montpellier, pp18
- [49]. Hubert P., Carbonnel J.P., et Chaouche A., 1989: Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, 1(10), pp 349-367.
- [50]. Houndénou C. & Hernandez K., 1998 : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). Sécheresse, 9(1), pp 23-34.
- [51]. Hirche A., Boughani A. & Salamani M., 2007 :Évolution de la pluviosité dans quelques stations arides algériennes. Sécheresse, Vol. 18 (4), 314-320.

- [52]. Hélène L., 1994 : Manuel de référence, logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. IRD, Université Montpellier, 2 Version 211.
- [53]. Jarraud M., 2006 : changements climatiques et gestion des risques, conférence de presse l'Organisation météorologique mondiale (OMM), La Pastorale » Route de Ferney 106, Genève
- [54]. IRD 1998: KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier. URL: <http://www.hydrosociences.org/spip.php?article 239>.
- [56]. Kettab A., 2001: "Les ressources en eau en Algérie, stratégies, enjeux et vision" Revue Desalination Copyright © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved; Volume 136, Issues 1-3, Pages 25-33.
- [57]. Kettab A., et Ait Mouhoub D., 2002: "L'eau Objet de Toutes les convoitises." Colloque International sur l'Eau," Chelef, 05-06 février, Algérie.
- [58]. Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., 2002 : Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie » Laboratoire de recherche en Sciences de l'eau – LRS – EAU/ENP Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) – Alger; Colloque international sur l'eau, Chelef, 05/06/février, Algérie.
- [59]. Kingumbi A., 2006 : Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.
- [60]. Khaldi A., 2005 : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur d'Etat à la faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire, Université d'Oran, Mai 2005.
- [61]. Kadi D., 1995: Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [62]. Khoualdia W., Mrad D., Djebbar Y., et Abida H., 2008 : Cycle, Tendance ou Changement Climatique Analyse Statistique de la Pluviométrie de la Région de Souk-Ahras,

Algérie. 4^{ème} conférence internationale sur Les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Alger, Algérie, 22-23 Mars 2008.

[63]. Khoualdia W.,et Djebbar Y., 2010: « sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant Nord de la Medjerda, Algérie».Colloque international CIEAU, 25-27 octobre 2010 Annaba.

[64]. Khoualdia W.,et Djebbar Y., 2011: « Changement de la variabilité de pluie et concepts de modèles probabilistes pour la gestion des ressources hydriques du bassin versant d'oued Medjerda : Est Algérien». Colloque international sur les ressources en eau et le développement durable CIRED'4 : ENSH/22 et 23 février 2011 Alger. Communication sur

[65]. Khoualdia W.,et Djebbar Y., 2012: « Contribution à l'étude de la sécheresse et son impact sur les ressources en eau de surface du bassin versant nord de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie) ». Colloque international «Géomatique et gestion des risques naturels»: 6-8 Mars 2012 université Oujda (Maroc).

[66]. Khoualdia W.,et Djebbar Y., 2013: Caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie). Colloque international «Hazards and Géomatics»: 17-20 Mai 2013 Hammamet - Tunisia.

[67]. Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y., 2014: Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014) (REVUE. SYNTHÈSE ANNABA).

[68]. Kouame KF., 2011 : “Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL,” Thèse d'Etat sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 p.

[69]. Leroux M., 2007 : Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Séminaire de travail "Évolution du climat", Académie des sciences, Paris, 12 p., URL : <http://www.biokurs.de/treibhaus/180CO2/Echanges-meridiens-Chang-clim.pdf>,

[70]. Lamarre D., 2008 : Climats et risque : changements d'approches. Édit. LAVOISIER, Paris, 170 p.

- [71]. Lahache RG., et Pillet G., 2008 : Projection des ressources en eau de la Tunisie sous les effets des changements climatiques globaux. XIIIth World Water Congress (Montpellier, 2008), 12 p.
- [72]. Lopez-mareno J.I., Vicente-serrano S.M., Moran-tejeda E., Lorenzo-lacruz J., Kenawy A. et Beniston M., 2011: Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: observed relationship and projections for the 21st century. *Global and Planetary Change*, vol. 77, p. 62-76.
- [73]. Lubes H., Gautier F., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., 1998 : Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950-1989. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(6).
- [74]. Lubes H., Masson J-M., Paturel J-E., Servat E., 1998 : "Variabilités climatiques et statistiques. Etude par simulation de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques," *Revue des Sciences de l'Eau*, n°3, pp 383-408, 1998.
- [75]. Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. OSTROM, Montpellier, France
- [76]. Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., et Boyer J.F., 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques - Etude bibliographique. Rapport n° 3 Programme ICCARE, ORSTOM Montpellier, 21p.
- [77]. Lee A.F.S. & Heghinian S.A., 1977: A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables – a Bayesian approach. *Technometrics*, vol. 19, n° 4, p. 503-506.
- [78]. Laborde J.P., 1993 : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- [79]. Le Monde, 2011 : Inondations : l'Australie s'attend à une facture record. URL: http://www.lemonde.fr/asie-pacifique/article/2011/01/17/inondations-l-australie-s-attend-a-une-facture-record_1466392_3216.html.

- [80]. L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., 2002: Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal des sciences Hydrologiques*, 47(4), 563-572.
- [81]. Lloyd-Hughes B., et Saunders A., 2002: Seasonal prediction of European spring precipitation from El Niño-southern oscillation and local sea-surface temperatures, *International J. Climat.*, 22, 1–14.
- [82]. McKee T.B., Doesken N.J., et Kleist J., 1995: Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology 1995, 15-20 January, Dallas, TX, 233(6).
- [83]. Matari A., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A., 1999: Sécheresse dans l'ouest algérien. *Publications de l'association internationale de climatologie*, volume 12, 1999.
- [84]. Meddi M. et Hubert P., 2003 : Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*. IAHS publication N° 278.
- [85]. Meylan P., Musy A., 1998: Cours d'hydrologie générale. HYDRAM-ISTE-Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>
- [86]. Morgenthaler S., 1997 : Introduction à la statistique, Presses polytechnique et Universtaires Romandes.
- [87]. Meddi M., Hubert J., 2000 : Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. 13ème colloque de l'Association Internationale de climatologie. 6 au septembre 2000 Nice, France.
- [88]. 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.
- [89]. Meko DM., 1985 : Temporal and spacial variabilation of drought in Marocco. *Procceding of conference on drought, water management and food production*, 21-24 november 1985. Agadir Maroc, 1985: 55-82.
- [90]. Morel R., 1999 : Saison sèche le long du golfe de Guinée. *Publications de l'association internationale de climatologie*, volume N0 12 ,1999.

- [91]. Moron Vincent, 1994: Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatology*, 14(3), pp 325-341.
- [92]. Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J., Wotling G., 2001: "Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa," *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226.
- [93]. Meddi H. & Meddi M., 2007 : Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Geographia Technica*, n° 2, 49-55.
- [94]. Meddi H. & Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, Vol 20, 57-67.
- [95]. Mebarki A., 2010: Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol 21, I 4. P. 3-10.
- [96]. Musy, A., 2001 : Hydrologie générale. Edit : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 330 p.
- [97]. Mebarki A., 2010: Apport des cours d'eau et cartographie du bilan hydrologique : cas des bassins de l'Algérie ; *Sécheresse*. Volume 21, Numéro 4, 301-8, octobre-novembre-décembre 2010, Article de recherche.
- [98]. Meddi H., et Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*; 20 : 57-65.
- [99]. Meylan P., Musy A., 1998: Cours d'hydrologie générale. HYDRAM-ISTE-Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), <http://hydram.epfl.ch/e-drologie>.
- [100]. Norrant C., 2004 : Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Étude diagnostique. Thèse de l'Université de Provence (Aix Marseille I), 266 p.
- [101]. Nouaceur Z., 2010 : Évaluation des changements climatiques au Maghreb. Étude du cas des régions du quart nord-est algérien. In : *Risques et changements climatiques, Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Rennes)*, p. 463-468.
- [102]. Nicholson S-E., 1994: "Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent," *The Holocene* 4,2 pp 121-131.
- [103]. OMM (2013), 2001-2010 : une décennie d'extrême climatique. Organisation Météorologique Mondiale, communiqué de presse n° 976, URL : http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_976_fr.html

- [104]. OMM-WMO., 2000: Detecting trend and other changes in hydrological data. In : Kundzewicz ZW, Robson A, eds. World Climate Programme Data and Monitoring. WCDMP-45. WMO/TD-n° 1013. Genève.
- [105]. OMM., Organisation Météorologique Mondiale 2011 : http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/gcs_2011_fr.html
- [106]. Ouarda Taha B.M.J., Rasmussen P.F., Cantin J.F., Bobée B., Laurence R., Hoang V.D. et Barabé G., 1999 : Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province du Québec. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 425-448.
- [107]. Opoku-Ankomah y. & Amisigo B.A., 1998: Rainfall and runoff variability in the southwestern river system of Ghana. *Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS Publ. n° 252, pp 307-321.
- [108]. Obassi, G.O., 1994: WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9, 655-1661.
- [109]. Pettitt A.N., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.
- [110]. Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M. et Masson J.M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part II: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191, pp 16-36.
- [111]. Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubes H., et Masson J.M., 1995 : Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, 6(1), pp 95-102.
- [112]. Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A., 2004 : Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. *Sud Sciences and Technologies*. N°13, pp 40 – 46.
- [113]. Paturel J.E., Servat E., Delattre M., 1998 : “Analyse des séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*,” volume 43, n°3, pp. 937-945.
- [114]. Palmer WC., 1965: Meteorological Drought Research Paper 45. US Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC.

- [115]. Querad J., Monton E. et Escrig J., 2011: Teleconnections between the North Atlantic SST and Mediterranean rainfall. *Tethys*, vol. 8, p. 31-42. URL : www.tethys.cat. DOI : 10.3369/tethys.2011.8.04.
- [116]. Rothschild E. et Beltrando G., 2007 : Évolution des températures observées en Suisse durant les dernières décennies. In : Risques et changements climatiques, Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie), H. Ben Boubaker édit., p. 489-494.
- [117]. Roche MF., 1986 : Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Paris: Masson, pp287.
- [118]. Rodier J-A., Colombani J., Claude J., Kallel R., 1981, Le bassin de la Medjerdah, Monographies hydrologiques, ORSTOM, DRES (Tunisie), 451 p.
- [119]. Richard Y., Camberlin P., Fauchereau N., 2002 : « El Nino-la Nina : cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud », *Espace géographique*, vol. 1, 63-72.
- [120]. Robles M., López N., Gadsden H., Pineda R., Reyes-Gómez M. et Hinojosa R., 2006 : Analyse des deficits hydriques dans l'état de Chihuahua (Mexique). *Sècheresse*, 17(4), 457-465.
- [121]. Svensmark H. et Friis-Christensen E., 2007: Reply to Lokwood and Fröhlich-The persistent role of the sun in climate forcing. Édit. Danish National Space Center, rapport scientifique, 2 p.
- [122]. Svoboda M., Hayes M., Heim R., Gleason K., Angel J., Rippey B., Tinker R., Palecki M., Stooksbury D., Miskus D., et Stephens S., 2002: The drought monitor, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1181–1190.
- [123]. Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H. et Badri W., 2012 : Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. In : Les climats régionaux : observation et modélisation, Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Grenoble), S. Bigot et S. Rome édit., p. 709-714.
- [124]. Sebbar A., Badri W., Foughrach H., Hsain M. et Saloui A., 2011 : Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse*, vol. 22, n° 3, p. 139-148.

- [125]. Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., et Marieu B., 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 363-387.
- [126]. Servat E., Paturel J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M. et Masson J.M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191, pp 1-15.
- [127]. Smith D.I., Hutchinson M.F., et Arthur Mc., 1993: Australian climatic and agricultural drought: payments and policy. *Drought Network News* 11(2).
- [128]. Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carboneil, 219 p.
- [129]. Sircoulon J., 1987: Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. *Proceedings of the Vancouver Symposium on the Influence of Climatic Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. IAHS Publ. n° 168, pp 13-25.
- [130]. Sanders L., 1990: L'analyse statistique des données en géographie, Reclus, 1990, 268 p.
- [131]. Sneyers R., 1975 : Analyse statistique des séries d'observations – Note technique n° 143 – OMM – GENEVE – SUISSE.
- [132]. Saadaoui M. & Ben Sakka M 2007 : Pluviométrie en Méditerranée occidentale et oscillation nord-atlantique (NAO), Actes du XXe colloque de l'association internationale de climatologie, 501-507.
- [133]. Senhadji, F. Senouci, M. 2007 : Impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique du bassin méditerranéen. Rapport final du projet, Paris, pp36.
- [134]. Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein T A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. et Zhai P., 2007 : Chapter 3: Regional climate projections. In : *Climate change 2007: the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor M et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 235-336. URL : <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter3.pdf>

- [135]. Tarhule Aondover & Woo Ming-ko, 1998: Changes in Rainfall characteristics in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 18(11), pp 1261-1271.
- [136]. Thirriot C., 1983 : Étude de la variabilité des séries suivant une chaîne de Markov binaire. Rapport interne. Institut de mécanique des fluides de Toulouse, CT 584, juillet 1983.
- [137]. Talia A. & Meddi M., 2004 : La pluvio-variabilité dans le Nord de l'Algérie. Actes du colloque "Terre et Eau" (Annaba, 2004), 477-480.
- [138]. The Nation, 25 Mai 2000 : <http://www.africanews.org/east/kenya/stories>.
- [139]. Vandiepenbeeck M., 1998 : El Niño : l'enfant terrible du pacifique. *Ciel et Terre*, 114(2), pp 52-56.
- [140]. Vissin E- W., 2007 : "Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger," Thèse de Doctorat. Hydroclimatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie - CNRS - UMR 5210. tel-00456097, version 1 - 11 Feb 2010. 285 p.
- [141]. White DH., O'Meagher B., 1995: Coping with exceptional droughts in Australia. *Drought Network News* 13(7).
- [142]. WMO, 1966 : Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology - Technical Note N° 79. Secretariat of World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland, 79p.
- [143]. Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H., 1997: The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- [144]. Zeineddine N., 2011 : Vers un retour des pluies sur la rive sud du bassin méditerranéen occidental: analyse et évaluation de la tendance pluviométrique sur plus d'un demi – siècle en Algérie. *The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series*, Tome 11 / 2011.
- [145]. Zeineddine N., Benoit L., et Imen T., 2013 : Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Géographie Physique et Environnement*, Vol. 7, p. 307-323.

Annexe

Article 1: Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien) Characterization of climate variability: case of watershed Medjerda (North East of Algeria)

Wacila Khoualdia^{1*}, Yassine Djebbar² & Yahia Hammar³
Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département d'Hydraulique
1-3 Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.
1- 2 Laboratoire de Gestion, Maintenance et Réhabilitation des Equipements et des Infrastructures
Urbaines
Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras.

Article soumis au Revue sciences et technologies Synthèse Annaba
29: 6-23 (2014)
(Soumis le : 09.12.2012 Révisé le : 06.04.2014 Accepté le : 09.04.2014).

Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien).

Characterization of climate variability: case of watershed Medjerda (North East Algeria).

Khoualdia Wacila^{1*}, Djebbar Yassine² & Hammar Yahia³.

Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département d'Hydraulique

¹⁻³Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

¹⁻²Laboratoire de Gestion, Maintenance et Réhabilitation des Equipements et des Infrastructures Urbaines
Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras.

Soumis le : 09.12.2012

Révisé le : 06.04.2014

Accepté le : 09.04.2014

ملخص

تبين هذه الدراسة أهمية بعض الطرق الإحصائية لتفسير التباين المكاني والزمني لهطول الأمطار، بحوض واد مجردة شمال شرق الجزائر، و المتمثلة في 16 محطة ممتدة على فترة زمنية من 19 إلى 38 سنة. أظهرت نتائج تحليل هذه السلاسل أنها تحوي إنقطاعات معظمها متواجدة بين فترتي الثمانينات والتسعينات، ثم بينت نتائج خرائط مؤشرات هطول الأمطار لكل عشرية للفترة الممتدة بين 1971-2007 تغيير مكاني وزماني، وقد بدا جليا أن سنوات الثمانينات والتسعينات تميزت بنقصان في الأمطار على كامل الحوض، مع استثناء عودة هطول الأمطار للفترة الممتدة بين 2001-2007. على السلم الشهري، سجل ارتفاعا ملحوظا لهطول الأمطار بعد سنوات الإنقطاعات في فصلي الشتاء والربيع عدا شهر مارس، مع تركيز استثنائي للأمطار في شهر أوت. أما على المستوى اليومي، فإن تحليل تجزئة هطول الأمطار يوضح اتجاهها في زيادة الأمطار الغزيرة الأكبر من 20 ملم بعد سنوات الإنقطاعات. كذلك لوحظ انخفاض في مجموع هطول الأمطار و زيادة مطردة في درجات الحرارة خلال الفترة الممتدة من (1913-1938) إلى (1969-2007) في حوض مجردة.

الكلمات المفتاحية: جفاف - تغير المناخ - تجزئة هطول الأمطار - حوض مجردة - شرق الجزائر

Résumé

Cette étude présente l'intérêt de certaines méthodes statistiques, pour interpréter la variabilité spatiotemporelle des précipitations dans le bassin versant de Medjerda Nord- Est Algérie. Seize stations pluviométriques sont utilisées dans cette étude sur une période allant de 19 à 38 ans. Les séries analysées présentent toutes des ruptures dont la majorité se trouve dans les décennies 80 et 90. La cartographie des indices pluviométriques interannuels calculés par décennie sur la période 1971-2007 montre que les décennies 80 et 90 apparaissent comme déficitaires sur tout le territoire du bassin. Ainsi, une tendance à un retour des précipitations est remarquée pour la période (2001-2007). À l'échelle mensuelle, les précipitations ont augmenté significativement après les années de rupture pour les mois d'hivers et du printemps, à l'exception du mois de mars. On observe aussi, une concentration exceptionnelle de pluie dans le mois d'Août. À l'échelle journalière, l'analyse des fractions pluviométriques journalières met en évidence une tendance à l'augmentation des pluies fortes supérieures à 20 mm après les années de ruptures. Le bassin de la Medjerda connaît aussi; une réduction de la pluviométrie, une augmentation de la température, à une période allant de (1913-1938) à (1969-2007).

Mots-clés : Sécheresse - Variabilité climatique - Fraction pluviométrique - Bassin versant Medjerda - Est de l'Algérie.

Abstract

This study has the advantage of some statistical methods to interpret the spatiotemporal variability of precipitation sixteen rainfall stations located in the watershed of Medjerda north east Algeria on a period ranging from 19 to 38 years. Whilst analyzing such series, there was an observed break in the period 1980 and 1990. Thus, the results of the mapping of interannual rainfall indices calculated per decade over the period 1971-2007 shows the decades 80 and 90 appear as deficit throughout the territory of the basin. Thus, a trend to a return of precipitation is noted for the period (2001-2007). At the monthly scale, precipitation increased significantly after years of failure for the winter months and spring, with the exception of March. An exceptional concentration of rainfall in the month of August is observed. At the daily scale, the analysis of daily rainfall fractions shows a trend of increase in the average annual rains total of more than 20 mm after years of failure. Basin Medjerda also known; reduced rainfall, increased temperature, a period (1913-1938) to (1969-2007).

Keywords: Drought - Climate variability - Rainfall fraction - Watershed Medjerda – East of Algeria.

*Auteur correspondant : mwacila@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Depuis ces dernières décennies, les différents États accordent un intérêt croissant au changement climatique qui demeure une notion très vaste (réduction de la pluviométrie, augmentation de la température, effet de serre, ...etc.

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté mondiale à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs impacts sur les ressources en eau. Parmi elles, on peut citer la sécheresse qui a affecté les pays du Maghreb, l'Algérie en particulier, depuis les années 1970 [1-10]. L'Algérie a connu durant son histoire de nombreuses périodes de sécheresses d'ampleur variable. Certaines ont eu des répercussions parfois dramatiques sur les conditions de vie de la population, notamment rurale (1943-1948) ; les sécheresses les plus sévères et les plus persistantes sont celles relevées durant les années 1980 à 90 où le déficit pluviométrique a été estimé à 50 % pour les régions du centre et de l'Ouest de l'Algérie et à 30% à l'est.

L'année 1988/1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie [11]. Cette sécheresse a eu un impact négatif sur le régime d'écoulement des oueds, sur l'alimentation de la nappe phréatique et sur le niveau de remplissage des barrages. Elle a été suivie par de nombreuses inondations qui ont été marquées sur tout le territoire algérien [12]. Parallèlement à cette sécheresse on note une évolution à la hausse des températures dans pratiquement toutes les stations. Cette nouvelle tendance s'exprime par une hausse plus affirmée des minimales et une recrudescence des vagues de chaleur [9,12].

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Elles sont faciles à mesurer. Autant de raisons qui font que la plupart des études et analyses portent sur les précipitations bien plus que sur d'autres paramètres du climat. Toutes les ressources sont conditionnées par les précipitations très irrégulières dans l'espace et dans le temps. La caractérisation de la tendance de la variabilité annuelle des précipitations est importante pour la prévision, la gestion des ressources hydriques, et l'étude des changements climatiques. Afin de mieux la caractériser, il est intéressant, de chercher à situer le changement temporel de la pluviométrie constatée depuis 38

ans dans la chronologie pluviométrique de ce siècle, époque pour laquelle on dispose d'enregistrements dans le bassin versant de Medjerda Nord-Est de l'Algérie. Pour déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, nous avons utilisé un certain nombre de tests statistiques sur seize stations pluviométriques possédant des séries de mesures pour une période allant de 1969 à 2007. La spatialisation des irrégularités des précipitations a été approchée par la représentation de la cartographie de l'indice pluviométrique. Des analyses statistiques et graphiques ont permis de caractériser les variations de la température de l'air de la zone d'étude. Une comparaison a été utilisée sur l'historique des pluies et des températures du bassin d'étude, afin d'analyser la tendance de l'évolution de ces variables climatiques de la période (1913-1938) à celle de la période (1969-2007).

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de Medjerda qui s'étale entre l'Algérie et la Tunisie occupe une superficie de 23700 km² dont 7600 km² en territoire algérien. Ce dernier est bordé au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'Ouest par les bassins d'oued Seybouse et des hauts plateaux Constantinois, au Sud par le bassin de Chott Melghrir, et à l'Est par la Tunisie. Ce bassin est aussi traversé par un des principaux oueds maghrébins, l'oued Medjerda au Nord et l'oued Mellegue au Sud (Fig. 1).

Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir: l'Atlas Tellien au Nord et Saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord, le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de montagnes dont l'altitude varie entre 1400 m et 700 m. Il se caractérise par une végétation très développée et dense. Au Sud, il est considéré comme le prolongement naturel des hautes plaines constantinoises sans pour autant en avoir les mêmes caractéristiques naturelles et physiques. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-Ouest, Nord-Est.

Cette structure est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du Phase Atlasique Eocène. Leur couverture est généralement mince. Cette zone se caractérise par un climat continental à influence méditerranéenne et désertique avec

une pluviométrie variant entre 200 et 950 mm/an. Le maximum des jours de fortes pluies hivernales et du vent violent rencontré en décembre- janvier, est provoqué par le passage successif des dépressions d'Ouest, de quelques dépressions méditerranéennes.

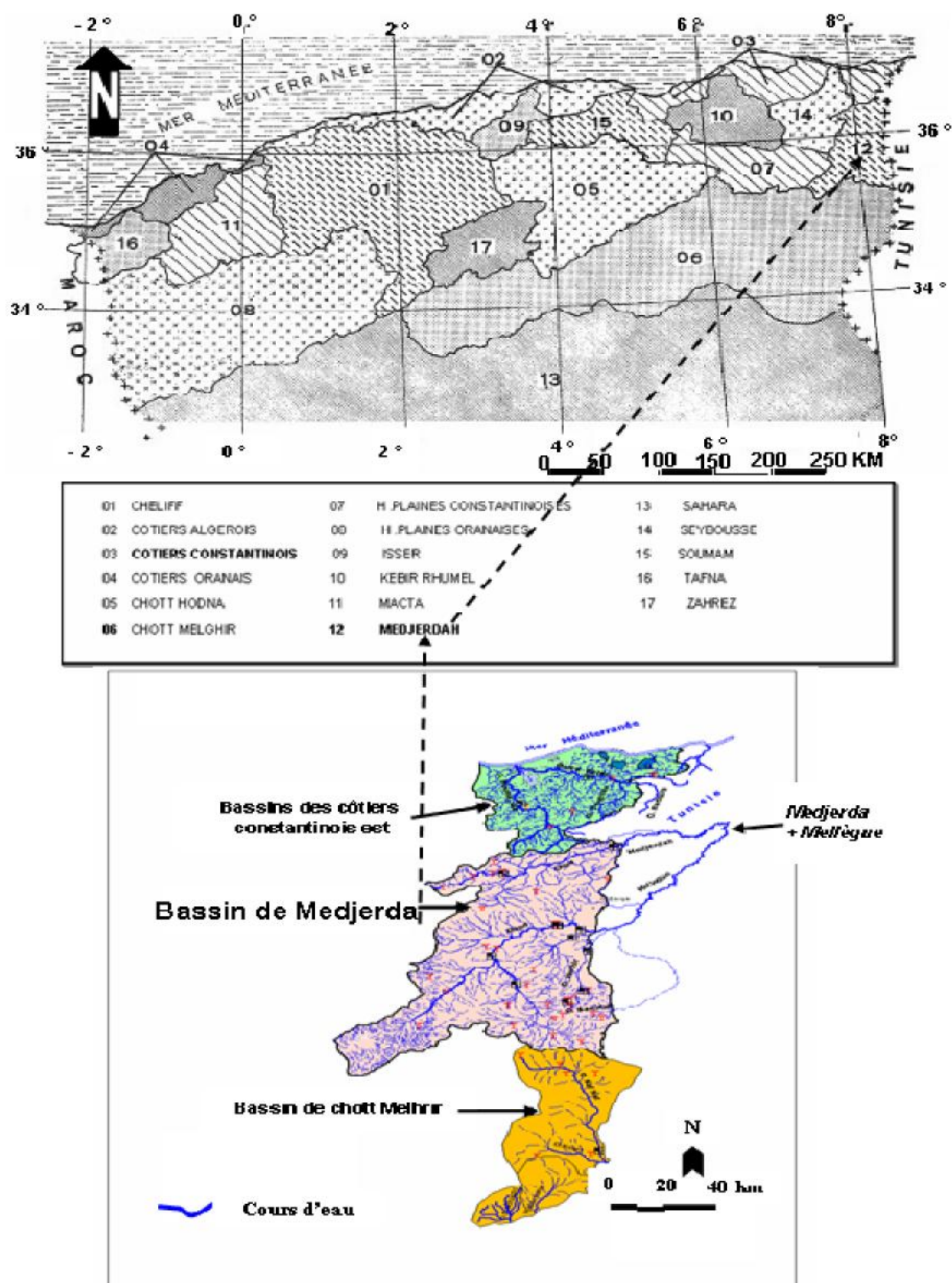


Figure 1 : Situation du bassin versant de Medjerda Nord-Est Algérie. (Source ANRH 2008)

3. DONNEES ET METHODES

3.1 Données disponibles

Les données pluviométriques proviennent des deux établissements responsables du réseau pluviométrique en Algérie, à savoir l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Office Nationale de Météorologie (ONM).

Dans ces séries de données climatiques ; il a été tenté d'identifier un maximum de postes de mesures répondant aux conditions suivantes:

- la taille de l'échantillon (information couvrant les quatre dernières décennies);
- la position géographique;
- la qualité des données (pas de lacunes de plus de trois années consécutives).

Seize stations dont les longueurs pluviométriques des enregistrements varient entre 19 et 38 ans ont été retenues (Tab. 1). L'homogénéité des séries pluviométriques des stations a été vérifiée par la méthode des doubles masses [13] ; ces séries ont donné des résultats satisfaisants.

Les années présentant des mois lacunaires ont été comblées si le déficit n'a pas été trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépasse pas 3 et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux. Pour les pluies journalières, trois stations ont été retenues Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza dont les chroniques sont disponibles et couvrent la période 1969-2007. Il a été également utilisé des séries climatiques (température et pluie) les plus longues et disponibles dans les stations de Souk-Ahras et Tébessa à une période de 25 ans (1913-1938) série de Seltzer [14].

En ce qui concerne les températures de l'air dans ces mêmes stations, elles couvrent respectivement les périodes (1978-2007) et (1969- 2007). Les périodes des données de température sont liées à la disponibilité de ces données au niveau du service de météorologie nationale. Les données utilisées ont servi à l'étude de la variabilité climatique dans le temps ainsi qu'à son impact sur les régimes climatiques saisonniers dans le bassin versant du Medjerda. Ces données sont assez homogènes, de bonne qualité et représentatives du bassin d'étude qui se situe entre 35° 11' et 36° 27' de latitude Nord et entre 7°11' et 8° 24' de longitude Est (Fig.2).

3.2 Méthodologie

L'approche adoptée comporte les opérations suivantes:

1. détection de rupture au sein des séries pluviométriques annuelles,
2. représentation spatiale des précipitations,
3. variation de la température de l'air,
4. caractérisation de la variabilité des précipitations mensuelles et journalières par rapport aux dates de rupture.

3.2.1 Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

« Rupture » doit être comprise comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu [15].

L'acceptation générale, mais surtout celle des hydrologues, en ce qui concerne les totaux annuels des précipitations, est que, du point de vue stochastique, ceux-ci peuvent être considérés comme un processus stationnaire. La caractéristique d'indépendance suppose que le cumul de précipitations d'une année n'est pas dépendant du total de précipitations enregistrées de l'année précédente. La stationnarité suppose que les propriétés de base du processus (par exemple, son niveau moyen) ne changent pas avec le temps. Cependant, plusieurs travaux récents signalent une situation inverse. Il est supposé que dans le contexte du réchauffement global actuel, aussi bien l'espérance mathématique que la variance de ce processus stochastique à l'échelle interannuelle ne seraient plus indépendantes du temps au temps. Les erreurs systématiques qui affectent d'une façon uniforme certaines portions des séries de mesure sont dues généralement au:

- déplacement ;
- changement d'environnement du pluviomètre pendant la période d'observation ;
- à la croissance d'un arbre qui fait obstacle ;
- un changement d'observateur ;
- à la lecture du pluviomètre non adéquate qui entraîne une forte hétérogénéité des séries pluviométriques [16].

C'est pourquoi l'objectif de ce travail est d'entreprendre une étude statistique sur les totaux annuels de précipitations, en utilisant le test statistique de Pettitt, la statistique de Buishand et ellipse de contrôle. Ces tests sont, avec d'autres, recommandés par l'organisation mondiale de la météorologie [17] pour détecter les ruptures au sein des séries temporelles. Cette démarche aidera à voir si ces ruptures dans la stationnarité sont liées seulement à des causes artificielles, ou si l'aléa climatique a un rôle prépondérant.

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 » [18]. Ces méthodes ne sont pas toutes adaptées à la recherche de plusieurs ruptures dans la même série.

Test de Pettitt

L'approche de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney [19]. L'absence d'une rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

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

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \text{sgn}(Z)=1 \text{ si } Z>0, 0 \text{ si } Z=0 \text{ et } -1 \text{ si } Z<0 \quad (2)$$

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$.

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

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

Pour un risque $\sim$ de première espèce donné, si $\text{Prob}(K_N > k)$ est inférieur à $\sim$, l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment t^* où est observé K_N . Une rupture primaire se définit comme une hétérogénéité identifiée par un test de rupture à partir de la série initiale. Une rupture secondaire est une rupture obtenue à partir d'une sous série issue de la série de base

Tableau 1: Liste des stations retenues pour les tests d'homogénéité.

No	Stations	Période d'observation	Latitude (km)	Longitude (km)	Altitude (m)	Moyenne pluviométrique (mm)
1	Ain Senour	1969-2000	964.05	348.20	830	945.00
2	Souk-Ahras	1969-2007	967.25	342.25	590	530.00
3	Ain Dalia	1988-2007	963.95	341.65	717	712.00
4	Khemissa	1971-2007	945.50	332.50	900	416.00
5	M'Daourouche	1969-2000	960.85	320.65	870	330.00
6	Ouenza	1969-2007	989.00	313.00	520	266.00
7	El Aouinette	1971-2007	967.80	297.40	650	254.32
8	Messloul	1970-2007	963.60	298.20	700	220.00
9	Boukhadra	1969-2007	982.25	285.95	900	319.20
10	Ouled Hamza	1969-2007	988.90	265.00	840	261.60
11	Tébessa	1969-2007	991.90	247.20	890	351.00
12	Bekaria	1971-2007	1002.35	244.55	895	207.35
13	Ras Elaouine	1971-2007	1006.50	261.20	995	286.00
14	Messkianna	1969-2007	949.70	271.00	845	270.00
15	Ain Dahla	1969-2007	940.85	250.40	980	287.25
16	Elkouiff	1969-2007	1009.70	259.15	1100	259.84



Figure 2 : Stations pluviométriques retenues (Bassin de Medjerda, Nord-Est Algérie).

Statistique U de Buishand [20, 21]

Le test ici présent est de nature Bayésienne. Il fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian [22]. En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par:

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (S_k^* / D_x)^2}{N(N+1)} \quad (4)$$

Ou:

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (5)$$

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

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

Les méthodes citées ci-dessus sont utilisées à travers le logiciel KRONOSTAT [23]. Ce dernier permet une visualisation des résultats de la présente étude en format numérique et graphique.

3.2.2 Caractérisation spatiale des précipitations (Cartographie des indices pluviométriques)

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années, la méthode de l'indice pluviométrique a été appliquée. Cette méthode a pour objet, la caractérisation de la variabilité de la pluviométrie locale ou régionale, afin de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires, et la mise en place d'un système d'alerte précoce de sécheresse.

Pour chacun des postes pluviométriques retenus, un indice de la pluie interannuelle a été déterminé. Il se définit comme une variable centrée réduite [24] exprimée par l'équation 6:

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (6)$$

avec :

X_i : valeur de la pluviométrie annuelle de l'année i ;

$\bar{X}$: valeur moyenne interannuelle de la pluviométrie sur la période étudiée;

S : valeur interannuelle de l'écart type de la pluviométrie sur la période étudiée.

L'étude de la variation spatio-temporelle de la pluviométrie s'est faite en utilisant les différentes données des stations pluviométriques qui couvrent la zone d'étude. Les données disponibles ont été calculées et classées sur les quatre décennies (1971 - 1980 ; 1981 - 1990 ; 1991 - 2000 ; 2001 - 2007) qui couvrent la période de disponibilité des données. La base de données obtenue est exportée sous le logiciel Surfer 8.0 où il a été procédé à une interpolation de type krigeage pour générer la carte thématique.

3.2.3 Analyse de la température de l'air

La température de l'air du bassin versant du Medjerda a été analysée à partir de la statistique descriptive (valeurs moyennes) et des représentations graphiques. Cette analyse a été effectuée à partir des données disponibles des deux stations : Souk-Ahras représentant la partie nord du bassin et Tébessa représentant la partie sud. Elle a permis de comprendre la variation saisonnière et interannuelle de la température dans ce bassin. En effet, ces différents paramètres influencent les précipitations dans une région donnée.

3.2.4 Caractérisation de la variabilité des précipitations mensuelles et journalières par rapport aux dates de rupture

La caractérisation des pluies mensuelles s'est limitée aux stations de Souk-Ahras, Ouenza, Boukhadra et Tébessa, dont les séries de données sont presque complètes et la période de l'étude est commune. Pour les pluies journalières, la caractérisation s'est limitée à la station de Souk-Ahras, Tébessa et Ouenza où des données sont disponibles sur une période de 38 ans soit du 1^{er} septembre 1969 au 31 août 2007. L'étude de la significativité de la variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle avant et après les années de rupture est d'interpréter la variabilité des précipitations à l'échelle mensuelle à partir des années de rupture. La méthode consiste donc à mesurer les

écarts entre les moyennes mensuelles des deux échantillons déterminés par la date de rupture. Quels sont les mois où les écarts sont les plus significatifs ?

L'influence de la sécheresse sur les pluies journalières a été abordée par l'étude des fractions pluviométriques journalières [25-26]. La méthode consiste à répartir le total annuel en trois fractions: F1, somme des précipitations journalières comprises entre 0 et 20 mm ; F2, somme des précipitations journalières comprises entre 20 et 40 mm et F3, somme des précipitations journalières supérieures à 40 mm.

4. RESULTATS

4.1 Tests d'homogénéité sur les pluies annuelles

Les dates de ruptures primaires détectées (1978, 1981, 1982, 1986, 1987, 1988, 1995, 1996, 1999 et 2001) sont liées à des probabilités de dépassement (Tab. 2). Les ruptures s'observent majoritairement dans les décennies 1980 et 1990 avec un niveau de signification qui varie d'un poste à un autre. Le niveau de signification traduit l'importance réelle ou pas d'un changement de la moyenne au sein de la série pluviométrique. Les ruptures primaires très significatives (seuil d'erreur <1%), ont été détectées dans les séries pluviométriques des stations de Messloul en 1982, Ouled hamza en 1986, Boukhadra en 1987, Khemissa en 1995 et Tébessa en 1999. Des ruptures primaires significatives (1% < seuil d'erreur <5%) sont détectées au niveau des séries Souk-Ahras et Ain Senour en 1999, Ain Dalia (1996), M'Daourouche (1981), El Aouinette (1999), Meskiana et Ain Dahla en 1982, Bekaria (1987), Ouenza (1988), Elkouif (2001) et Ras ElAouine (1978).

Des ruptures secondaires sont identifiées au niveau des stations de Tébessa (1974), El Aouinette (1984) et Ras ElAouine (1999), à travers l'analyse des courbes de la variable U du test de Pettitt. La figure 3 illustre le cas de la série de Tébessa. La rupture est ici traduite par un changement brutal dans l'allure d'évolution de la courbe. On note deux ruptures, successivement en 1974 et 1999, pour la courbe de la série de Tébessa. La rupture secondaire traduit une baisse de la pluviométrie à partir de 1974. Une tendance de reprise à la hausse de la pluviométrie est observée en 1999. La figure 4

présente les ellipses des quatre stations représentatives du site d'étude, station de Souk-Ahras au Nord, station de Boukhadra au Centre, et stations d'Ouled Hamza et Tébessa au Sud. L'analyse des résultats de la figure 4 montre que les ruptures sont observées au sein des séries avec un niveau de signification qui varie d'une série à l'autre.

Sur l'ensemble de seize stations de cette étude, les séries de données pluviométriques présentent des ruptures plus ou moins significatives. Ces hétérogénéités identifiées

traduisent une baisse de la pluviométrie, entamée à partir des années 1970. Cette baisse de la pluviométrie a été amplifiée au cours de la décennie 1980. Une tendance de reprise à la hausse des hauteurs pluviométriques au cours de la décennie 1990 est amorcée. Ces ruptures coïncident avec les années des grandes sécheresses déterminées dans les études antérieures en Algérie [1, 3, 4, 6, 9, 10], qui situent la plupart des ruptures à partir de 1970, et persiste dans les décennies 80 et 90.

Tableau 2 : Principales dates de rupture des séries pluviométriques

N°	Stations	Période d'observation	Dates de rupture
1	Ain Senour	1969-2000	1999
2	Souk-Ahras	1969-2007	1999
3	Ain Dalia	1988-2007	1996
4	Khemissa	1971-2007	1995
5	M'Daourouche	1969-2000	1981
6	Ouenza	1969-2007	1988
7	El Aouinette	1971-2007	1999
8	Mess loula	1970-2007	1982
9	Boukhadra	1969-2007	1987
10	Ouled Hamza	1969-2007	1986
11	Tébessa	1969-2007	1999
12	Bekaria	1971-2007	1987
13	Ras ElAouine	1971-2007	1978
14	Mes kiana	1969-2007	1982
15	Ain Dahla	1969-2007	1982
16	Elkouif	1969-2007	2001

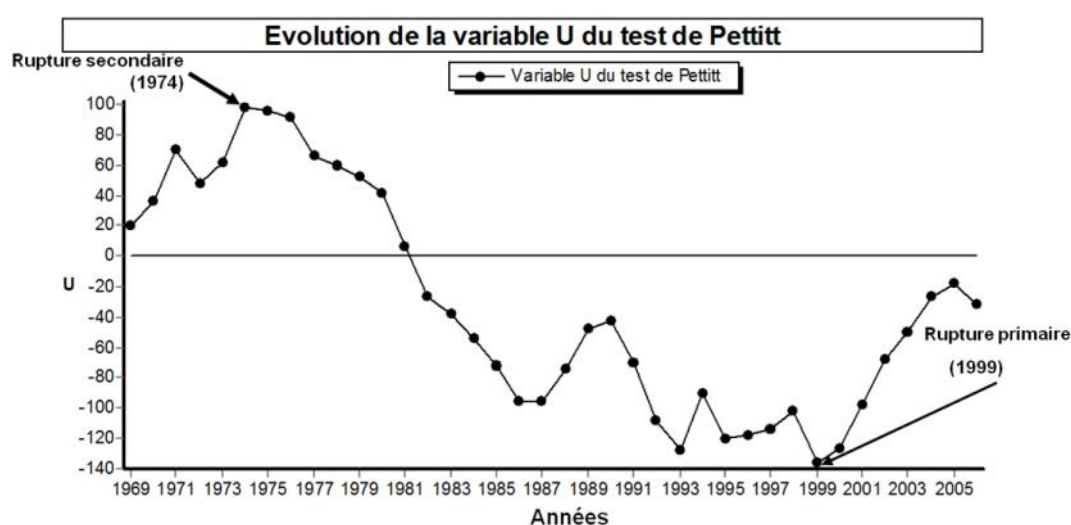


Figure 3: Courbe de la série pluviométrique de Tébessa (dates de rupture: 1974 et 1999)

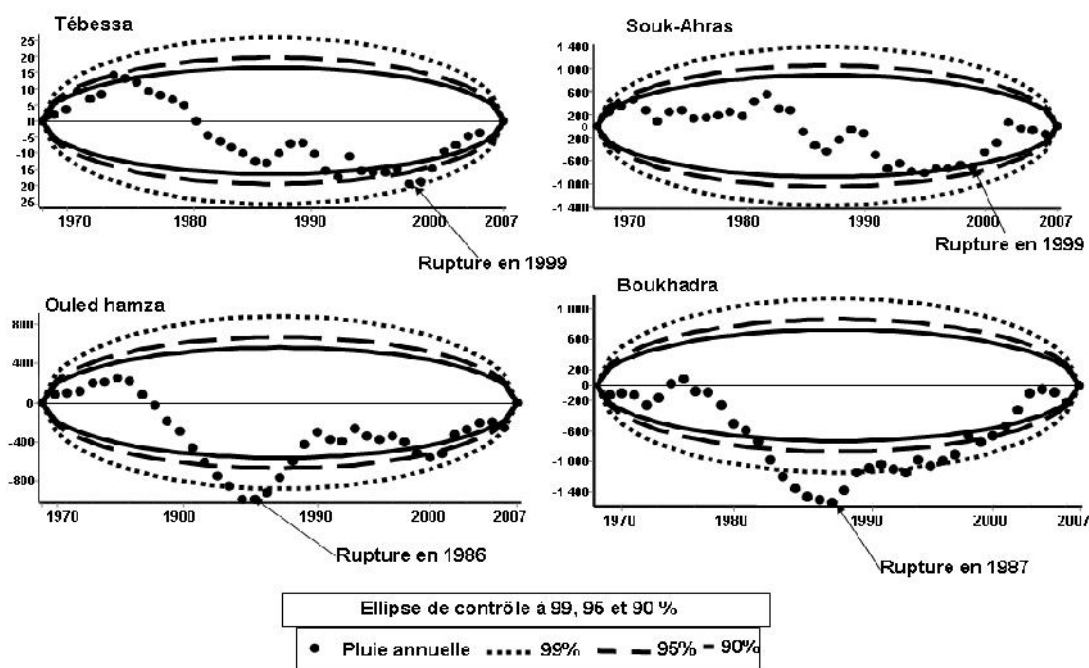


Figure 4: Ellipses de contrôle des pluies annuelles (1969 – 2007)

4.2 Variabilité spatio-temporelle des pluies annuelles

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des indices pluviométriques annuels au cours des différentes décennies, de 1971 à 2007, a permis de situer le bassin versant de la Medjerda dans son contexte local (Fig. 5). Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin liées à la latitude et à la longitude. La décennie 1971-1980 se distingue par une alternance de zones excédentaires et déficitaires. On observe la présence d'un caractère excédentaire avec des indices pluviométriques compris entre 0 et 0.9 dans les parties Sud-Ouest, Sud-Est et Nord-Est du bassin. Par contre, on observe un caractère déficitaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0 et -0.7 dans la partie Nord-Ouest. Pour la décennie 1981-1990, l'apparition d'un caractère déficitaire avec des indices pluviométriques qui varient entre 0 et -0.5 se trouve sur la totalité du bassin. Pour la décennie 1991-2000, le caractère déficitaire s'observe sur tout le bassin mais s'accroît et apparaît très

marqué dans la zone Sud-Ouest avec des indices pluviométriques compris entre 0.5 et -0.7. La dernière décennie (2001-2007) semble annoncer une tendance à un retour des précipitations, avec la réduction du champ des forts déficits. Les indices pluviométriques sont plus élevés, et oscillent entre 0.5 et 2 dans la partie Nord-Ouest, Centre et Sud-Est du bassin. La cartographie des indices pluviométriques, du bassin versant de la Medjerda, a permis de mettre en évidence la tendance générale à la baisse de la pluviométrie, à partir de la décennie 1970, qui s'est aggravée au cours des décennies 80 et 90, et un retour à l'augmentation des précipitations dans la décennie 2000.

Cependant, l'ensemble du bassin n'a pas été touché de la même manière, compte tenu de l'influence des climats locaux (climat sub-humide au Nord, semi-aride au Sud, influence des deux types de climat dans le centre du bassin).

Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat du Nord-Est algérien [27, 28]. La carte de l'A.N.R.H. [29] montre que les moyennes pluviométriques sont

inférieures d'environ 10 % à celles de la série de Chaumont et Paquin [30]. Ces deux auteurs ayant eux-mêmes constaté une diminution des précipitations par rapport à celles cartographiées par Seltzer [14]. Ces résultats sont aussi en concordance avec ceux trouvés, sur des séries moins longues par Laborde en 1993 [2] qui indique que la baisse de la pluviométrie dans le Nord de l'Algérie, s'est installée après la décennie 70 d'une manière significative. Les tests utilisés et les résultats obtenus confirment cette tendance. Les longues sécheresses observées dans le bassin d'étude, se localisent dans les décennies 80 et 90.

Ces résultats sont en conformité avec les conclusions du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat de 2001 et de 2007 [31], ainsi qu'avec les conclusions du rapport régional des Nations Unies sur le changement en Afrique du Nord. Ces périodes peuvent être utilisées, comme périodes de référence, représentant la sécheresse dans la région d'étude. Elles peuvent être utilisées dans la conception des systèmes de gestion des ressources hydriques en périodes de sécheresse.

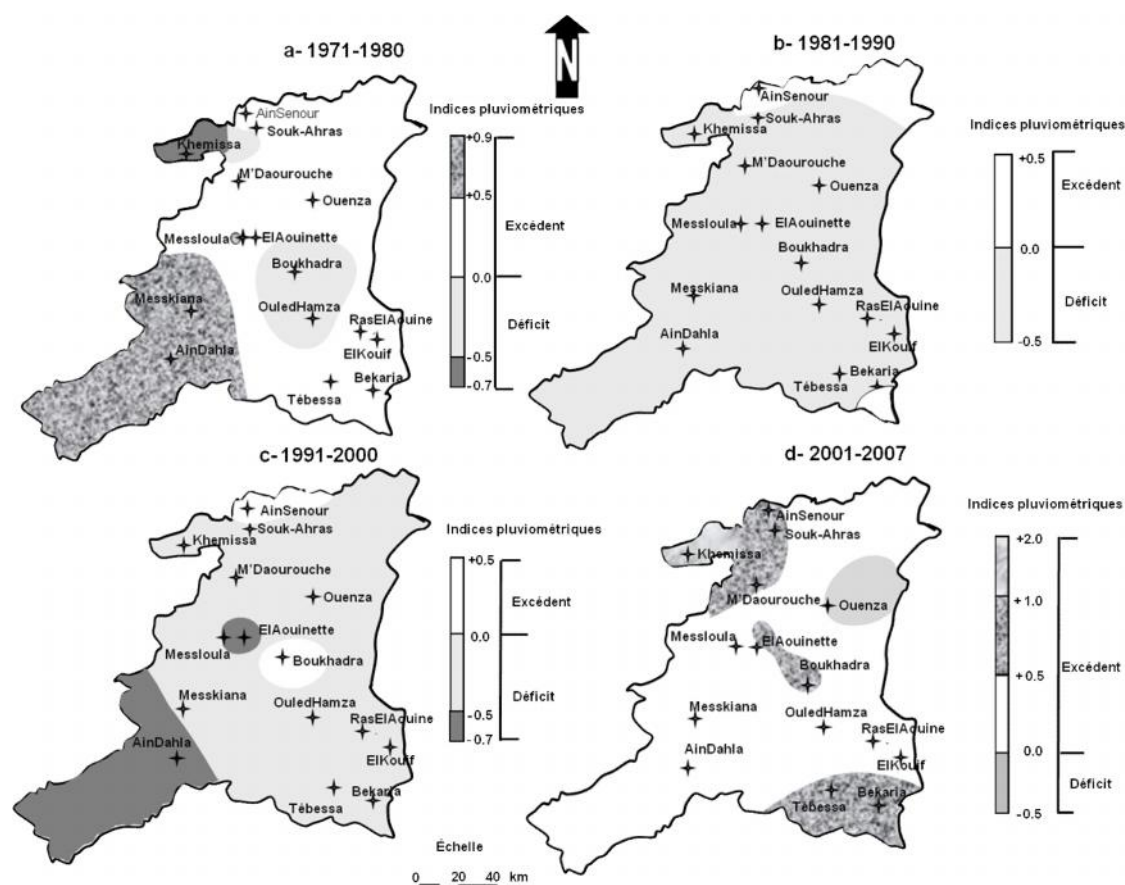


Figure 5: Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Medjerda (1971-2007)

4.3 Variations de la température de l'air

Les valeurs moyennes de la température de l'air, permettent de suivre l'évolution moyenne du régime thermique au niveau du bassin d'étude (Tableau 3). Les températures

moyennes mensuelles au niveau de Souk-Ahras varient entre 24 et 25.43°C août et 6.25 et 7.4°C janvier. Quant à celles de la station de Tébessa, elles varient entre 26.80 et 27.31°C en août et 6.44 et 6.10°C en janvier. Les moyennes mensuelles maximales sur le bassin s'observent

en général pendant le mois d'août. Les variations interannuelles de la température de l'air montrent que cette dernière connaît une hausse régulière sur toute la période d'étude de Tébessa et de Souk-Ahras. Au niveau de la station de Souk-Ahras (Fig 6a), la température est restée inférieure à 15.5 °C avant 1976 et supérieure à 15.5 °C après 1976. De même, au niveau de Tébessa (Fig 6b), la température de l'air est restée inférieure à 16.24°C avant 1987 et supérieure à 16.24°C à partir de 1987. On constate donc qu'il fait de plus en plus chaud sur l'ensemble du bassin. Des valeurs supérieures à la moyenne ont été enregistrées à partir de la décennie 1970.

Cette tendance a été accentuée, à partir des années 1980 avec des températures supérieures à 16.24°C en moyenne dans le sud du bassin, où il est enregistré pour l'année 87-88, une température de 22.52°C en moyenne annuelle. Ces températures ont atteint les plus fortes

valeurs au cours de la décennie 1990 et ne semblent pas régresser. Les diagrammes reliant température et pluie, ou diagrammes ombro-thermiques, aux stations de Souk-Ahras et Tébessa (Figs 7a et 7b) sur les différentes périodes, permettent d'observer, en général, de faibles valeurs de température pendant les mois de fortes pluviométries et de fortes valeurs pendant les mois de faibles pluviométries. Le tableau 3 montre que les températures moyennes mensuelles observées pour la deuxième période des deux stations sont supérieures à celles de la période (1913-1938). Le réchauffement a été de l'ordre 0.89 °C à Souk-Ahras et de 0.35 °C à Tébessa. Cet accroissement de température participe au changement climatique local et global, et s'accorde avec les observations faites par ailleurs sur l'augmentation des températures au cours des dernières décennies en Algérie

Tableau 3: Températures mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Tébessa	1913-1938	6.1	7.5	10.4	14.05	18.3	23.45	26.8	26.25	22.65	16.55	11.35	7.25	15.89
	1978-2007	6.44	7.59	11.31	14.57	19.48	23.97	27.31	26.62	21.95	18.27	10.43	6.90	16.24
Souk-Ahras	1913-1938	6.25	7.25	9.3	12.65	15.95	20.5	23.9	24	21	15.85	11.2	7.3	14.60
	1969-2007	7.4	8.02	10.02	12.34	17.02	21.8	25.27	25.43	21.43	17.01	11.73	8.26	15.49

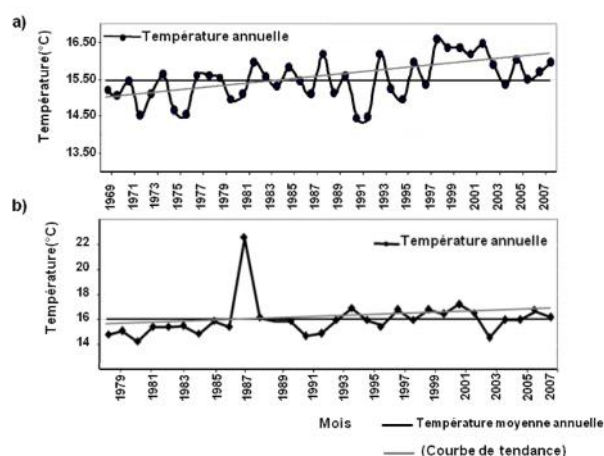


Figure 6. Variations interannuelles de la température de l'air : a- Souk-Ahras (1969-2007) ; b- Tébessa (1978-2007).

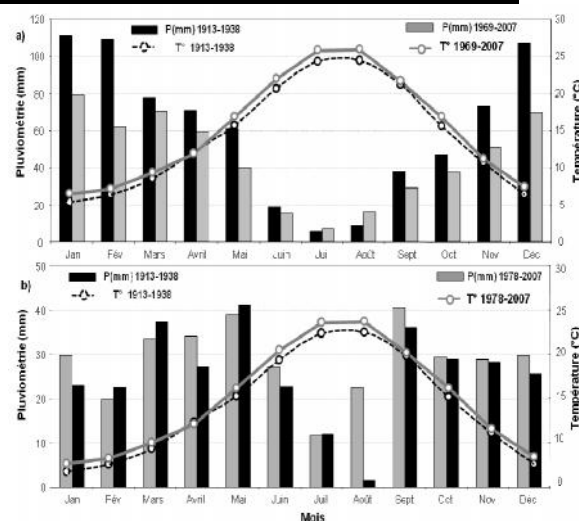


Figure 7. Diagrammes ombro-thermiques: a- Souk-Ahras; b-Tébessa.

4.4 Variation des pluies mensuelles

Pour placer la variation des pluies mensuelles du bassin d'étude dans son contexte historique, une analyse a été réalisée sur la période 1913-1938, à partir des séries de données les plus longues et disponibles des deux stations de Souk-Ahras et Tébessa, (Tab.4). Les pluies moyennes mensuelles, observées pendant la période (1969-2007) à la station de Souk-Ahras sont inférieures à celles de la période (1913-1938), soit une diminution au total de l'ordre de 26 % accompagnées d'une augmentation des pluies estivales de l'ordre de 54 %. Cependant, pour la station de Tébessa la deuxième période (1969-2007), s'est révélée excédentaire à celle de la période (1913-1938) soit une augmentation au total de 17 % (avec une augmentation très marquée de l'ordre de 78 % pour la saison estivale). Cette augmentation peut expliquer la forte variabilité dans le caractère orageux. En revanche, les résultats de la figure 8 des quatre stations principales, dont

les chroniques sont les plus complètes mettent en évidence les excédents des pluies mensuelles après les dates de rupture des décennies 80 et 90. Un déficit pluviométrique mensuel est observé au mois de mars pour l'ensemble de ces stations. Si l'on examine les diminutions relatives des précipitations avant la rupture de stationnarité de la fin des années 80 ou des années 90, la diminution des pluies moyennes mensuelles est de l'ordre de 15 % et 24.5 % pour la station de Tébessa et Souk-Ahras respectivement avant 1999, 64 % et 6 % pour la station de Boukhadra et Ouenza avant 1987 et 1988. On notera, cependant que, ce bassin connaît une diminution pluviométrique mensuelle avant les dates des ruptures et une tendance à la hausse après ces dates. L'ensemble de ce bassin a été touché par une irrégularité pluviométrique mensuelle temporelle sur la totalité des mois durant ces dernières décennies.

Tableau 4: pluies moyennes mensuelles aux stations de Souk-Ahras et Tébessa (1913-1938 et 1969-2007)

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Tébessa	1913-1938	23.00	22.60	37.40	27.08	41.20	22.83	11.97	1.60	36.15	29.02	28.18	25.72	25.56
	1969-2007	30.30	25.33	40.90	35.07	37.70	27.75	13.44	23.70	37.62	30.64	30.21	28.39	30.09
Souk-Ahras	1913-1938	111	109	78	71	61	19	6	9	38	47	73	107	60.75
	1969-2007	79.45	61.89	70.38	59.56	40.28	15.87	7.14	16.11	29.27	37.62	50.93	69.67	44.85

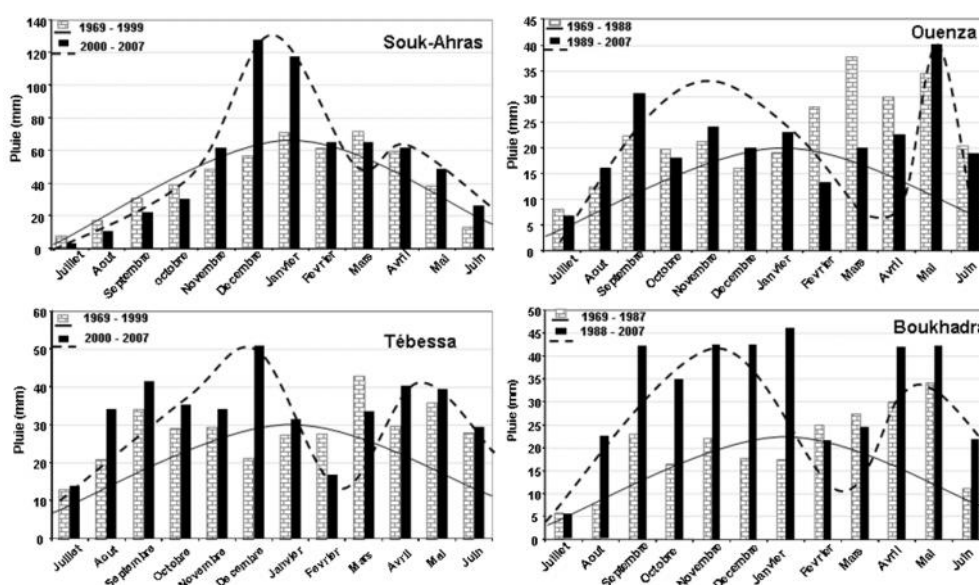


Figure 8. Précipitations mensuelles moyennes avant et après rupture aux stations de Souk-Ahras, Ouenza, Boukhadra et Tébessa.

4.4.1 Les années de rupture marquent le début d'hiver et la fin du printemps particulièrement pluvieux et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août

Les excédents de décembre janvier

Sur les quatre stations, la moyenne des mois de novembre, décembre et janvier calculée sur la période après rupture est largement supérieure à la moyenne de la période précédente. Les écarts sont très marqués respectivement, en particulier à Souk-Ahras et Boukhadra rapport de 2.27 et 2.46 au mois de décembre, rapport de 1.65 et 2.50 au mois de janvier et au mois de novembre 1.27 et 2.09. Ces résultats sont à nuancer car ils peuvent être la conséquence des précipitations remarquables concentrées en une seule année. Le mois décembre 2002 fut le plus pluvieux depuis 1969 sur le bassin versant d'étude (256.5 mm à Souk-Ahras, 148.6 mm à Tébessa et 81 mm à Ouenza).

Les excédents d'avril, mai et juin

Comme pour le mois décembre, les ruptures de 1999 et 1987 par exemple font ressortir le mois d'avril comme particulièrement pluvieux sur la période 1999 - 2007 et 1988 - 2007 par rapport à la période précédente. A l'exception, la station de l'Ouenza présente, dans l'ensemble des trois postes ; des écarts positifs. Les stations de Tébessa, de Boukhadra et de Souk-Ahras montrent des écarts très importants, respectivement 1.36, 1.27 et 1.05. Le mois de mai enregistre certaines valeurs exceptionnelles durant la dernière décennie: 108 mm à Souk-Ahras en 2002; 72.7 mm à Tébessa en 2007; 91.9 mm à Ouenza en 2005; 82 mm à Boukhadra en 2005, ces valeurs sont très supérieures à la normale. Le mois de juin aussi enregistre certaines valeurs exceptionnelles durant la dernière décennie: 82.2 mm à Souk-Ahras en 2000; 82.2 mm à Tébessa en 2003; 64.1 mm à Ouenza en 2003; 88.2 mm à Boukhadra en 2000, ces valeurs sont, également, très supérieures à la normale. Des pluies excédentaires, localisées dans la dernière décennie 2000, sont remarquables.

Une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août

En été, dans la région d'étude, de gros orages présentant de fortes intensités durant une période n'excédant pas généralement les 30 minutes, sont observées. Le mois d'août présente des excédents significatifs depuis 1970 confirmés par les postes témoins. Il convient de s'interroger sur les caractères de ce mois durant la dernière décennie. Les précipitations d'août, sont souvent associées aux catastrophes pluvieuses dans le Nord et le Sud du bassin. Il y a effectivement une concentration de ces pluies exceptionnelles (supérieures à 30 mm en 24 heures). Toute fois, il est difficile d'interpréter la variabilité de ces pluies. Depuis 1969, on dénombre 10 et 9 épisodes sur l'ensemble du Sud et le Nord du bassin, dont 6 et 4 enregistrées respectivement dans la décennie 80 et 90. Le bassin versant de Medjerda a enregistré durant cette période d'étude 136.7 mm à Souk-Ahras, 93 mm à Tébessa, 49 mm à Ouenza, 50.1 mm Boukhadra. Des pluies exceptionnelles ont eu lieu le 22 Août 2002 au bassin d'étude, ont produit des inondations, dégâts matériels importants et la mort de 3 personnes. Ces pluies sont caractérisées par d'importantes précipitations en peu de temps. Elles sont très irrégulières d'une année à l'autre et leur période de retour est difficile à calculer

Les déficits du mois de mars

La moyenne du mois de mars après rupture est inférieure à celle de la période avant rupture. Les écarts sont marqués à Ouenza où le rapport est de 0.5 entre les deux périodes. Ils sont tout aussi importants à Tébessa (0.79), à Boukhadra (0.89) et à Souk-Ahras (0.9). A Souk-Ahras, la normale climatique (1969 / 1990) est de 100 mm au mois de mars. Depuis 1990, seul le mois de mars 2004 a été supérieur à la normale, les autres années, il a été observé des cumuls inférieurs à 50 mm et parfois même égale à 3 mm au mois de mars. Le mois de mars en 1992 a été le plus sec du bassin versant de la Medjerda sur la période d'étude; 3.3 mm à Souk-Ahras, 7.1 mm à Tébessa, 4.5 mm à Ouenza et 2 mm à Boukhadra.

D'après une étude sur le sud du bassin méditerranéen le mois de mars accuse un sérieux déficit depuis le début des années 1990, avec des conséquences parfois désastreuses [32].

4. 5 Variation des fractions pluviométriques

L'étude des précipitations annuelles et mensuelles a clairement montré la variabilité temporelle des totaux annuels et mensuels durant la période d'étude, sans toutefois, décrire le phénomène en recherchant quels sont les paramètres qui ont varié de façon significative. Il a été dégagé l'influence de la sécheresse sur les pluies journalières par l'étude des fractions pluviométriques journalières. L'analyse des résultats obtenus (Tab. 5) montre qu'elles évoluent de façon indépendante. F1 varie avec des coefficients de variations compris entre 0.31 et 0.34 et F2 varie avec des coefficients de variations compris entre 0.66 et 1.10. Par contre F3 varie avec des coefficients de variation très élevée. Ainsi, une tendance à la hausse du cumul des pluies supérieures à 20 mm (qui sont considérées comme les fortes pluies) semble se dessiner à partir des années de rupture pour les trois stations, dont les chroniques journalières sont disponibles (Figs 9 et 10). Ces différents résultats ont permis d'avoir le comportement temporel des fractions pluviométriques qui constituent un facteur dans la tendance d'explication de la variabilité pluviométrique. Cette forte variabilité peut expliquer l'irrégularité des pluies et leurs caractères orageux. Cette nouvelle phase pluvieuse coïncide avec une recrudescence dans le pays de catastrophes de type inondations urbaines. Ces épisodes pluvio-orageux ont généré à plusieurs reprises de graves inondations meurtrières. L'épisode le plus tragique est celui qu'a connu en 2001 le quartier Bab – El Oued d'Alger (la crue subite de l'Oued Koriche a fait plus de 800 morts) [12]. Les pluies diluviennes en août 2002 à Souk-Ahras et Tébessa ont provoquées la mort de 3 personnes et des dégâts matériels importants. En 2008, les pluies diluviennes qu'a connue la région du M'Zab ont provoqué la crue de l'oued M' Zab et la submersion de la ville de Ghardaïa. Là encore, les victimes se comptent par dizaines. Plusieurs autres villes algériennes ont enregistré ces dernières années une recrudescence de ce type de phénomène. Les pluies tant attendues après ces deux décennies de sécheresse sont ainsi de plus en plus redoutées par les populations locales. Cette augmentation de fréquence des catastrophes de type inondation confirme que les cycles pluviométriques en Algérie se caractérisent désormais par des pluies plus intenses [33, 34]. De multiples interrogations

peuvent être formulées quant aux causes et aux conséquences, voir même à l'existence d'une variabilité de la pluviométrie, au cours de ces dernières décennies en Algérie. Elles ont augmenté de façon importante mais tout aussi irrégulière et s'étalent sur un petit nombre de jours depuis le début des années 1990 [9]. De nombreux travaux sont effectués sur la corrélation entre la variabilité des précipitations et l'élévation de la température [31, 35]. La période 1990 / 2000 est considérée comme la plus chaude du XX^{ème} siècle. La moyenne décennale des températures (2001 – 2010) représente la moyenne la plus élevée depuis le début des relevés des instruments météorologiques [35]. Parallèlement à cette hausse, une augmentation probable des précipitations [31] est attendue. Cela coïncide ou corrélé avec les résultats trouvés ci-dessus dans la zone d'étude. Il apparaît que la température est un facteur de l'irrégularité de la variabilité temporelle des régimes pluviométriques saisonniers. En effet, ce paramètre atmosphérique influence fortement la variabilité temporelle des variables pluviométriques. Or, les résultats précédents de l'étude montrent une baisse des variables pluviométriques dans les décennies 80 et 90 et une reprise pluviométrique après les dates de ruptures de ces décennies, ainsi qu'une hausse des températures au cours des dernières décennies est observée dans le bassin versant de Medjerda. Partant de ces constats, on peut dire que l'irrégularité la variabilité climatique des dernières décennies de la zone d'étude dépend :

- d'une part, de la hausse de la température de l'air, - et d'autre part, elle coïncide avec des changements importants qui influent sur le climat local, à savoir :

- Pendant les années 60, le bassin d'étude avait un taux d'urbanisation relativement faible et était entouré par des chaînes de forêts importantes dans la partie Nord. A partir des années 70 la déforestation a hâté et le bassin d'étude a connue une croissance accélérée de la population.
- les activités industrielles dans la région Nord et Sud du bassin d'étude.
- la construction des barrages Ain Dalia et Oued Charef mises en service en 1987.

Le changement du climat local peut trouver sa source dans la déforestation, l'urbanisation, les activités industrielles et la construction de deux barrages. Ces surfaces d'eau n'altèrent pas les grands mécanismes de précipitation dans la

région, mais elles peuvent être derrière les pluies de type convective d'été de plus en plus fréquentes et intenses dans cette région. Dans tous les cas, elles ne peuvent pas expliquer à elles seules ces changements.

Tableau 5 : Différentes fractions pluviométriques journalières des trois stations dont les chroniques sont disponibles									
	Période 1969-2007			Période avant rupture			Période après rupture		
	0-20	20-40	> 40	0-20	20-40	> 40	0-20	20-40	> 40
Souk-Ahras									
Moyenne	381.48	82.77	52.03	365.62	82.29	42.87	440.95	84.55	86.36
Ecart type	118.55	54.24	53.06	116.44	57.50	46.90	114.01	42.94	63.75
Coeff. variation	0.31	0.66	1.02	0.32	0.70	1.09	0.26	0.51	0.74
Tébessa									
Moyenne	264.04	50.73	33.31	249.34	47.59	36.15	319.19	62.51	22.68
Ecart type	94.75	38.90	48.00	94.52	39.91	48.54	77.73	34.63	47.49
Coeff. variation	0.36	0.77	1.44	0.38	0.84	1.34	0.24	0.55	2.09
Ouenza									
Moyenne	180.27	58.52	20.32	198.51	54.14	13.13	162.03	62.90	27.51
Ecart type	60.66	64.51	39.13	63.60	41.43	22.69	53.08	82.45	50.23
Coeff. variation	0.34	1.10	1.93	0.32	0.77	1.73	0.33	1.31	1.83

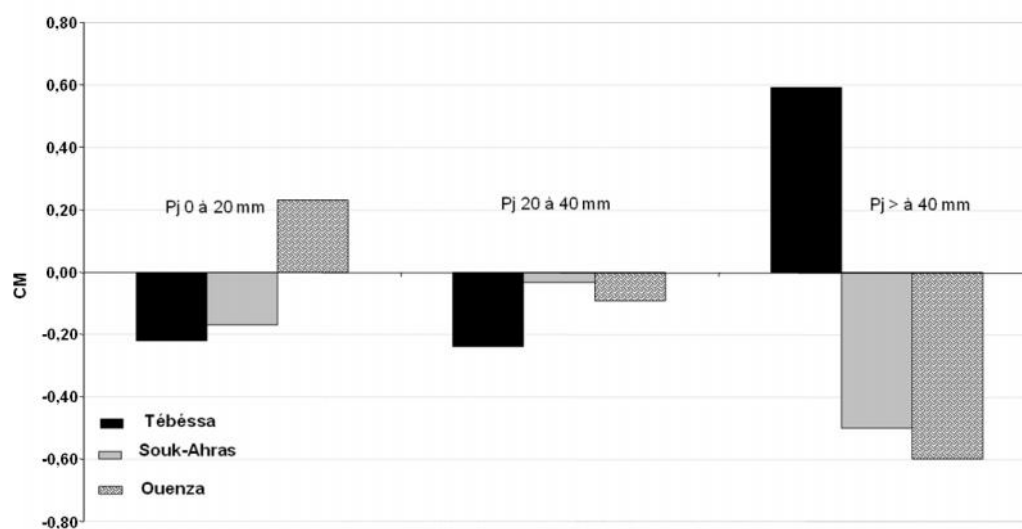


Figure 9: Changements de moyenne (CM) pour différentes fractions pluviométriques avant et après la rupture
Pj : précipitations journalières < 20 mm, 20 à 40 mm, > 40 mm
. CM = rapport moins un entre la valeur annuelle moyenne sur la période après rupture et celle sur la période avant rupture.

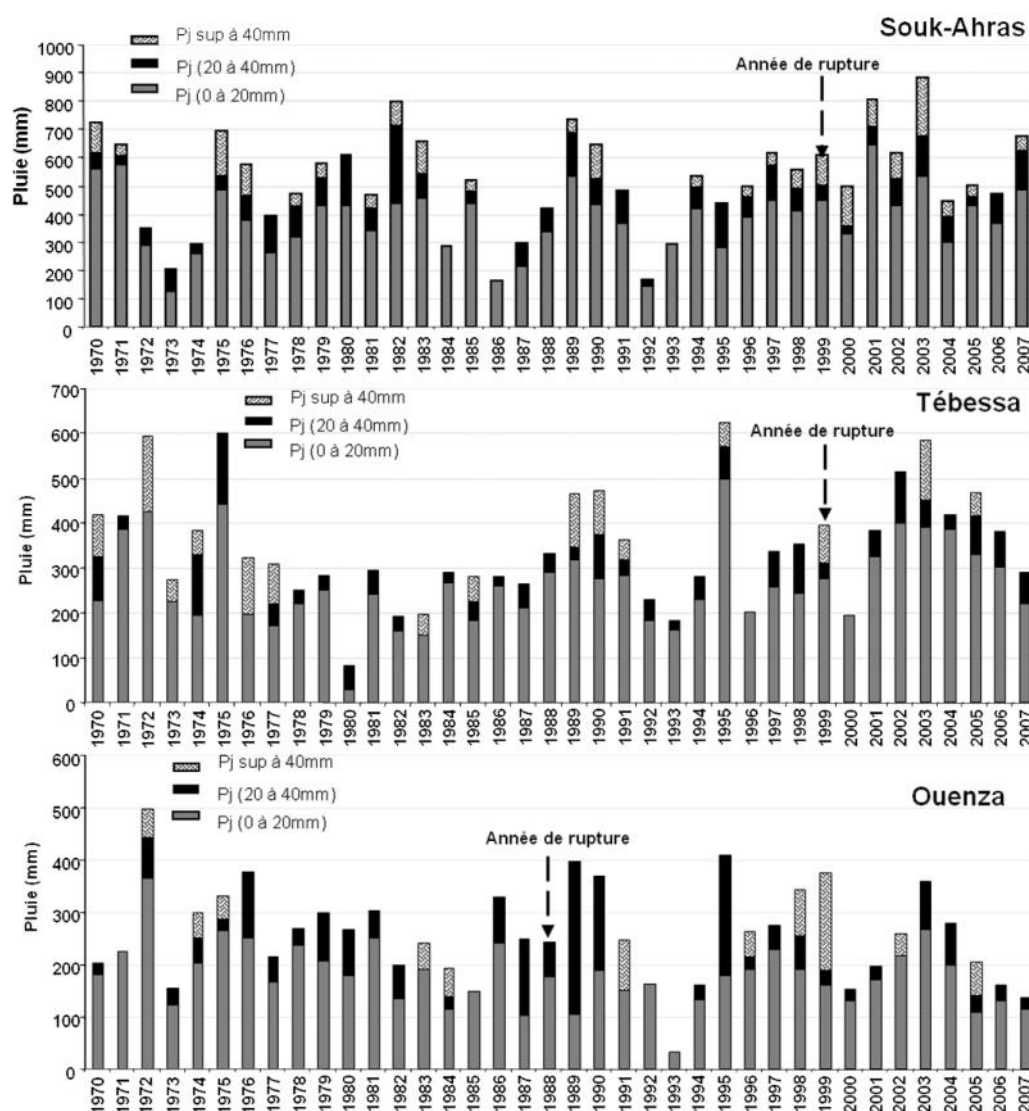


Figure 10. Valeurs annuelles de différentes fractions pluviométriques (précipitations journalières < 20 mm, de 20 à 40 mm et > 40 mm).

5. CONCLUSION

L'analyse des séries pluviométriques, du bassin versant de la Medjerda, de la période 1969-2007 montre que les chroniques ne sont pas stationnaires et qu'elles ont subi une rupture dont la date est comprise entre 1978 (RasElAouine) et 2001 (El Kouif). Sur l'ensemble des tests de détection de rupture, des ruptures sont identifiées autour de la décennie 1980 (1981, 1982, 1986, 1987, 1988) et de la décennie 1990 (1995, 1996, 1999). Il est noté que la majorité des ruptures se localisent dans les décennies 80 et 90. À l'échelle mensuelle, en analysant les stations dont les chroniques sont les plus complètes (Souk-Ahras, Tébessa,

Ouenza et Boukhadra), il est noté une très grande irrégularité mensuelle après les dates de rupture des décennies 80 et 90. Il est observé une augmentation des pluies au début de l'hiver et au printemps avec un déficit au mois de mars et une concentration des pluies exceptionnelles au mois d'août.

L'influence de la sécheresse sur les pluies journalières se trouve mise en évidence par l'étude des fractions pluviométriques des trois principales stations. Une tendance à la hausse du cumul de pluies supérieur à 20 mm (considérées comme les fortes pluies) se dessine à partir des années de rupture. Aux variations temporelles, s'ajoutent les variations spatiales

des précipitations. Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur l'ensemble du bassin. La décennie 1971-1980 se distingue par une alternance de zones excédentaires et déficitaires. Les décennies 1981-1990 et 1991-2000 apparaissent comme déficitaires. La période 2001-2007 semble excédentaire. Le bassin connaît une diminution pluviométrique au total avec une augmentation des pluies estivales. Ainsi, une hausse régulière des variations interannuelles de la température de l'air pourrait être derrière la prédominance des orages de ces dernières décennies. Mais cette prédominance ne peut pas expliquer à elle seule ce changement.

Ces résultats corroborent avec celles de l'étude de Zeineddine [9] qui affirme que les longues sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix et qui confirme le retour de pluie durant les dernières années de la série (2002 - 2006). Les observations faites en 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 et 2012 confirment aussi la prédominance de conditions plus humides, puisque le Ministère de l'Agriculture Algérien a annoncé pour l'année 2010, une production céréalière record de 62 millions de quintaux, un chiffre jamais atteint par l'agriculture algérienne. Les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état aussi d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % sur ces dernières années. Parallèlement à cette tendance, on note aussi une nette recrudescence des pluies orageuses dans presque la totalité des stations. Les pluies qui s'abattent sur le territoire algérien sont ainsi devenues plus intenses, cet argument est d'ailleurs conforté par une augmentation sans précédent des inondations et des crues dévastatrices dans le pays [9,12]. Cependant, la période récente 2007-2013 n'étant pas prise en compte dans cette étude, il serait intéressant d'intégrer cette période dans des recherches futures, afin de déterminer si cette tendance à la hausse des températures et des précipitations constatée se poursuit dans la zone d'étude.

REMERCIEMENTS :

Nous remercions l'ensemble des structures qui nous ont fourni les données indispensables à la réalisation de ce travail.

6. REFERENCES

- [1] Djellouli Y., & Daget P., 1993. Conséquences de la sécheresse des deux dernières décennies sur les écosystèmes naturels algériens, Publication Association International Climatologique, 6, pp105-14.
- [2] Laborde J.P., 1993. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- [3] Talia A. & Meddi M., 2004. La pluvio-variabilité dans le Nord de l'Algérie. Actes du colloque "Terre et Eau" (Annaba, 2004), p. 477-480.
- [4] Meddi H. & Meddi M., 2007. Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Geographia Technica*, n° 2, p. 49-55.
- [5] Hirche A., Boughani A. & Salamani M., 2007. Évolution de la pluviosité dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse*, vol. 18, n° 4, p. 314-320.
- [6] Meddi H. & Meddi M., 2009. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, vol 20, p. 57-67.
- [7] Meddi M. & Humbert J., 2000. Étude des potentialités de l'écoulement fluvial dans le Nord de l'Algérie en vue d'une réalimentation des aquifères. In : *Eaux sauvages, eaux domestiquées, Hommage à L. DAVY*, Publications de l'Université de Provence, p. 177-190.
- [8] Meddi M. & Hubert P., 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : *Hydrology of the mediterranean and semiarid regions, IAHS publication*, n°278, p. 229-235.
- [9] Zeineddine N., 2011. Vers un retour des pluies sur la rive sud du bassin méditerranéen occidental: analyse et évaluation de la tendance pluviométrique sur plus d'un demi – siècle en Algérie. *The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series*, Tome 11 / 2011.
- [10] El Mahi A., Meddi M., Matari A. & Ketrouci K., 2004. État de la pluviométrie en période de sécheresse en Algérie du nord et sa

relation avec le phénomène ENSO. Actes du colloque "Terre et Eau" (Annaba, 2004), p. 420-423.

[11] Kettab A. & Ait Mouhoub D., 2002. L'eau objet de toutes les convoitises, Colloque international sur l'eau, Chelef, 05 /06/ février, Algérie.

[12] Benazzouz A., 2011. Conférence sur les inondations majeures en Algérie, Séminaire International UVREDA, Utilisation et valorisation des ressources en eau pour le développement durable des écosystèmes arides, Centre de Recherche Scientifique et technique sur les Régions Arides, Biskra, 13-14 novembre.

[13] Brunet-Moret Y., 1971. Etude de l'homogénéité des séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. Cah. O.R.S.T.O.M., série Hydrologie, Vol.VIII, n°4. 3-31.

[14] Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel, 219 p.

[15] Lubes H., Gautier F., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950-1989. Journal des sciences hydrologiques, 43(6).

[16] Cantat O., 2004. Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20ème siècle en Basse- Normandie : Réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. Annales de l'Association Internationale de Climatologie, Vol I, 11, p. 13-31.

[17] OMM-WMO., 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. In : Kundzewicz ZW, Robson A, eds. *World Climate Programme Data and Monitoring*. WCDMP-45. WMO/TD-n° 1013. Genève.

[18] Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. OSTROM, Montpellier, France.

[19] Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.

[20] Buishand T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol. 58, p. 11-27.

[21] Buishand T.A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 73, p. 51-69.

[22] Lee A.F.S. & Heghinian S.A., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables – a Bayesian approach. *Technometrics*, vol. 19, n° 4, p. 503-506.

[23] IRD 1998. KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier. URL: <http://www.hydrosiences.org/spip.php?article239>.

[24] Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M., & Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (Abidjan'98 Conference), Publication IAHS, n° 252, p. 323-337.

[25] Albergel J., 1986. Évaluation de la pluviométrie en Afrique Soudano-Sahélienne exemple du Burkina-Faso. In : *Colloque CIEH sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse* (Ouagadougou), 19 p.

[26] Dacosta H., 1989. Précipitation et écoulements sur le Bassin de la Casamance. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 278 p.

[27] Mebarki A., 2010. Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. Science et changements planétaires / Sécheresse, Vol 21, I 4. P. 3-10.

[28] Belloum A., 2009. Hydrologie agricole en Algérie—une double problématique. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 38, I 6, 1993, p 479-495.

[29] A.N.R.H., 1993. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une notice de 49 p), Ministère de l'Equipement, Alger, Ed. I.N.C.

[30] Chaumont M., & Paquin C.,1971. Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000. Alger : Soc. Hist. Afri. Nord.

[31] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007. Rapport 2001 et 2007 sur l'évolution du climat. Genève. 20p.

[32] Blöchliger H., & Neidhöfer F., 1998. Impacts des précipitations extrêmes, Rapport de l'orange consultatif en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques, pp 40.

[33] Zeineddine N., Benoit L., et Imen T., 2013. Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? Géographie Physique et Environnement, Vol. 7, p. 307-323.

[34] Saadaoui M. & Ben Sakka M 2007. Pluviométrie en Méditerranée occidentale et oscillation nord-atlantique (NAO), Actes du XXe colloque de l'association internationale de climatologie.

[35] OMM., Organisation Météorologique Mondiale 2011.
http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/gcs_2011_fr.html