

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

— جامعة أبي بكر بلقايد— تلمسان —

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE
Département d'HYDRAULIQUE



THESE DE DOCTORAT ES SCIENCES EN HYDRAULIQUE

Spécialité : **Hydraulique**

Présentée par

ADJIM Hayat Ep. DJEDID

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PHENOMENES HYDROLOGIQUES – CAS
DE LA SECHERESSE**

Application au bassin du barrage Hammam Boughrara

Soutenue publiquement le **01 / 12 /2018** devant le jury composé de :

BOUANANI	Abderrazak	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
DJEDID	Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
YEBDRI	Djilali	Professeur	U.S.T.M.B. Oran	Examineur
TIDJANI	Abdellatif El-Bari	Professeur	U.S.T.M.B. Oran	Examineur
SEDDINI	Abdelali	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2018/2019

Dédicaces

Au terme de cette thèse, je tiens à la dédier à ceux et celles qui m'ont encouragé et supporté.

A la mémoire de mon père.

A ma mère qui n'a jamais cessé de m'encourager.

A ma petite famille, mon mari et mes enfants Abderrahmane, Imad Eddine, Salah Eddine et Youcef, pour leur soutien et leur patience durant toutes ces années.

A mes frères Mohamed, Nasr-eddine et Djamel qui ont toujours été présents au besoin.

A ma belle sœur Fouzia pour sa disponibilité et ses encouragements.

A mes sœurs, belles-sœurs, neveux et nièces.

A Zahéra, Hadjer et Nour El Houda.

A ma belle famille.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Monsieur Djedid Abdelkader, Professeur au Département d'Architecture de l'Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, qui, avec son expérience et sa disponibilité, m'a guidé le long de la réalisation de ce travail. Ses conseils et ses recommandations m'ont été précieux.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur Bouanani Abderrazak, Professeur au Département d'Hydraulique de l'Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, Monsieur Yebdri Djilali, Professeur au Département d'Hydraulique de l'Université des Sciences et de Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, Monsieur Tidjani Abdellatif El-Bari, Professeur au Département d'Hydraulique de l'Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran et Monsieur Seddini Abdelali, Professeur au Département d'Hydraulique de l'Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen d'avoir acceptés de faire partie du jury et d'examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Je remercie également tous ceux et celles qui m'ont apporté leur aide durant la réalisation de ce travail. Je cite particulièrement ma nièce Hammou Yamna, enseignante à l'université des sciences et technologie Oran (USTO) qui a su me donner de son temps précieux principalement pour l'élaboration des programmes. J'adresse également mes remerciements à Monsieur Boudghène Stambouli Tarik, Enseignant au département d'électrotechnique de l'USTO pour son aide et ses explications qui m'étaient très bénéfiques et à monsieur Chettih Mohamed professeur à l'université Amar Tilidji Lagouat qui a été à l'origine de mon intérêt aux ondelettes.

Je tiens aussi à remercier les enseignants de mon Département qui m'ont toujours encouragé à finir cette thèse. Je cite particulièrement les collègues de ma promotion de Magister, Wassila Fandi, ainsi que le noyau ancien du Département dont Mr Bouanani et Mr Terfous étaient la cheville ouvrière.

Tables des matières

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Liste notations	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	xi

Introduction générale

1. Préambule	1
2. Genèse de la thématique	2
3. Problématique et motivations	2
4. Organisation de la thèse	3

Chapitre 1 : Climat et Changement Climatique

1. Introduction	4
2. Le climat	4
3. Les types de climats dans le monde	5
4. Le climat en Algérie	6
5. Changement climatique dans le monde	7
5.1. Débat autour du changement climatique,	7
5.2. Les conséquences du changement climatique sur la planète	9
6. Le changement climatique au Maghreb	11
6.1. Impact du changement climatique sur le Maroc	11
6.2. Impact du changement climatique sur la Tunisie	12
6.3. Impact du changement climatique sur l'Algérie	13
7. Conclusion	16

Chapitre 2 : Etude climatique du bassin du barrage Hammam Boughrara

1. Introduction	17
2. Genèse du projet du barrage Hammam Boughrara	17
3. Présentation du barrage Hammam Boughrara	18
4. Présentation du bassin du barrage Hammam Boughrara	19
4.1. Hydrographie du bassin du barrage Hammam Boughrara	19
4.2. Morphométrie et géographie du bassin du barrage Hammam Boughrara	20
5. Etude climatique du bassin du barrage Hammam Boughrara	21
5.1. Introduction	21
5.2. Etude des précipitations	21
5.2.1. Aperçu sur les données	21
5.2.2. Vérification du caractère aléatoire des observations	22
5.2.3. Vérification de l'homogénéité de la station de Maghnia	24

5.2.4. Adéquation des précipitations avec une loi de distribution	25
5.2.5. Irrégularité des précipitations dans le temps	26
5.3. Etude des températures	27
5.3.1. Aperçu sur les données	27
5.3.2. Variation mensuelle des températures	28
5.3.3. Les indices d'aridité	30
• Indice de Martonne	30
• Le diagramme ombrothermique	32
5.4. Evapotranspiration et déficit d'écoulement	33
5.4.1. Méthode de Thornthwaite	33
5.4.2. Méthode de Turc	34
5.4.3. Méthode de Coutagne	34
5.4.4. Méthode de Tixeront-Berkaloff	35
5.4.5. Application	35
• Méthode de Thornthwaite	35
• Méthode de Turc	36
• Méthode de Coutagne	36
• Méthode de Tixeront-Berkaloff	36
6. Conclusion	36

Chapitre 3 : Variabilité climatique et sécheresse

1. Introduction	38
2. Définition de la sécheresse	39
3. Méthodes de caractérisation des sécheresses	40
3.1. Méthodes basées sur les indices	40
3.1.1. Ecart standardisé par rapport à la moyenne	40
3.1.2. Indice des précipitations normalisé (Standard Precipitations Index –SPI)	44
3.1.3. Indice de Pita	48
3.2. Méthodes de l'analyse fréquentielle	51
3.3. Moyennes mobiles	54
3.4. Méthodes basées sur les tests statistiques	58
3.4.1. Introduction	58
3.4.2. Autocorrélogramme et intervalle de confiance	58
3.4.3. Test de corrélation sur le rang	59
3.4.4. Test de Buishand et ellipse de Bois	60
3.4.5. Test de Pettitt	60
3.4.6. Segmentation de Hubert	61
3.4.7. Application aux stations retenues	62
▪ Station de Hammam Boughrara	62
• Autocorrélogramme et test sur le rang	62
• Recherche de ruptures	63
▪ Station de Maghnia	64
• Autocorrélogramme et test sur le rang	64

• Recherche de ruptures	64
▪ Station de Béni Bahdel	66
• Autocorrélogramme et test sur le rang	66
• Recherche de ruptures	66
▪ Station de Zenata	68
• Autocorrélogramme et test sur le rang	68
• Recherche de ruptures	68
3.5. Etude et examen des débits	69
3.5.1. Introduction	69
3.5.2. Autocorrélogramme et test sur le rang	69
3.5.3. Etude de la variabilité par les indices	70
3.5.4. Recherche des ruptures	72
3.6. Etude et examen des températures	73
3.6.1. Introduction	73
3.6.2. Autocorrélogramme et test sur le rang	74
3.6.3. Recherche de rupture	75
4. Etude de projection des conditions climatiques	76
4.1. Introduction	76
4.2. Les processus autorégressifs	76
4.3. Les processus intégrés	77
4.4. Les moyennes mobiles	77
4.5. Utilisation des modèles ARIMA	77
4.6. Application du modèle ARIMA	78
4.6.1. Stationnarisation des séries temporelles	78
4.6.2. Degré d'intégration des précipitations	81
4.6.3. Degré d'intégration des séries des températures et des précipitations	81
4.6.4. Validation du modèle	84
4.6.5. Prévisions climatiques	87
5. Etude de la persistance de la sécheresse à l'aide des chaînes de Markov	89
5.1. Introduction	89
5.2. Définition et propriétés	89
5.3. Application des chaînes de Markov d'ordre 1	90
5.4. Application des chaînes de Markov d'ordre 2	92
6. Etude de la régularisation	94
6.1. Introduction	94
6.2. Evaluation de la pluie moyenne sur le bassin du barrage Hammam Boughrara	94
6.3. Application des chaînes de Markov d'ordre 1	90
6.4. Application des chaînes de Markov d'ordre 2	92
7. Conclusion	97

Chapitre 4 : Approche par ondelettes de la variabilité climatique

1. Introduction	98
2. Les transformées mathématiques	99
2.1. Généralités	99
2.2. Transformées de Fourier	100
2.3. Transformées de Fourier à fenêtre glissante	100
2.4. Transformées en ondelettes	100
2.5. Pavage du plan dans les transformées de Gabor et de Fourier	101
2.5.1. Pavage du plan temps-fréquence par la transformée de Gabor	101
2.5.2. Pavage du plan temps-fréquence par la transformée en ondelettes	101
2.6. Ondelette de référence et ses propriétés	102
2.6.1. Généralités	102
2.6.2. Transformées en ondelette continue et en ondelette discrète	105
• Les transformées en ondelettes continues	105
• Les transformées en ondelettes discrètes	105
2.6.3. Transformées orthogonales et non-orthogonales	105
2.6.4. Fonction d'ondelette réelle et fonction complexe	106
2.6.5. Les coefficients d'ondelettes	107
2.6.6. Niveau de signifiante	110
2.7. Choix de l'onde mère	110
2.8. Choix des échelles	110
2.9. Application des transformées en ondelettes aux séries du bassin du barrage Hammam Boughrara	112
2.9.1. Introduction	112
2.9.2. Régression polynomiale	112
2.9.3. Approche par ondelettes	117
• Choix des ondelettes à appliquer	117
• Application aux précipitations de Hammam Boughrara	120
• Application aux précipitations de Maghnia	121
• Application aux précipitations de Beni Bahdel	123
• Application aux précipitations de Zenata	124
• Application aux apports du barrage Hammam Boughrara	125
3. Conclusion	127
Conclusion générale	128
Références bibliographiques	130

Résumé

La sécheresse est un phénomène naturel qui se produit à cause des fluctuations climatiques et dont les conséquences diffèrent d'une région à une autre. En Algérie, ce phénomène a été constaté avec sévérité et particulièrement dans sa région Nord-Ouest. Les méthodes pour le caractériser sont nombreuses et largement décrites dans la littérature scientifique. Cette thèse s'intéresse à ce phénomène et aux méthodes qui permettent de l'identifier et de le caractériser. Pour cela, le bassin du barrage Hammam Boughrara, barrage de l'extrême Nord-Ouest du pays a été choisi comme objet d'étude.

Dans un premier temps, ce sont les méthodes classiques qui ont été appliquées aux séries de données de pluies et de températures appartenant à ce bassin. Qu'il s'agisse des méthodes basées sur les indices, les méthodes donnant les tendances ou les méthodes qui détectent les ruptures, les indications sont semblables : une tendance à la baisse des précipitations et une tendance à la hausse des températures.

Dans un second temps, c'est une analyse par ondelettes qui a été proposée. L'application des ondelettes de Morlet, de Paul, de Daubechies et le chapeau mexicain aux séries de données pluviométriques et hydrologiques sélectionnées pour l'étude de ce bassin confirme globalement les tendances exprimées précédemment par les méthodes classiques avec de meilleures significations au niveau des cycles et des fréquences d'apparition des phénomènes climatiques et hydrologiques.

Il ressort en conclusion que les méthodes permettant de détecter les périodes de sécheresses se complètent et que les différences dans les pronostics sont dues aux outils utilisés par ces méthodes. La méthode des ondelettes, malgré sa complexité, présente des perspectives encourageantes.

Mots clés : Bassin, Hammam Boughrara, sécheresse, tendance, rupture, tests statistiques, ondelettes.

Contribution to the study of hydrological phenomena - Case of drought. Application to the "Hammam Bouhrara dam" basin.

Abstract

Drought is a natural phenomenon that occurs because of climatic fluctuations and the consequences of which differ from one region to another. In Algeria, this phenomenon has been observed with severity and particularly in its North-West region. The methods to characterize it are numerous and widely described in the scientific literature. This thesis focuses on this phenomenon and on the methods that make it possible to identify and characterize it. For that, the basin of the dam "Hammam Bouhrara", located in the extreme north-west of the country, was chosen as an object of this study.

In first, classical methods were applied to the rainfall and temperature data recorded in this basin. The methods based on the indices, those giving the trends or those which detect the breaks, gives similar results: a tendency to fall of the precipitations and a tendency to the rise of the temperatures.

In a second step, a wavelet analysis has been done. The application of the wavelets of Morlet, Paul, Daubechies and the Mexican hat to the pluviometric and hydrological data selected for this study confirms the tendencies previously expressed by the classical methods with better meanings on frequency occurrence of climatic and hydrological phenomena.

It is concluded from this thesis that methods for detecting drought periods complement each other and that difference in prognoses are due to the tools used by these methods. The wavelet method, despite its complexity, presents encouraging prospects.

Key words: Basin, Hammam Bouhrara, drought, trend, rupture, statistical tests, wavelets.

مساهمة في دراسة الظواهر الهيدرولوجية، حالة الجفاف. تطبيق على حوض سد حمام بوغرارة

ملخص

الجفاف هو ظاهرة طبيعية تحدث بسبب التقلبات المناخية وتختلف نتائجها من منطقة إلى أخرى. لوحظت هذه الظاهرة في الجزائر وقد كان لها تأثير سلبي كبير على مخزون المياه، خاصة في الجهة الشمالية الغربية منها.

لتحديد ووصف ظاهرة الجفاف يوجد الكثير من الطرق والمناهج والتي قد نشرت وبكثرة في عديد من المقالات العلمية المختصة. تعد هذه الأطروحة مساهمة في دراستها، وقد اختير حوض سد حمام بوغرارة لتطبيقها.

في المرحلة الأولى، تم تطبيق الطرق التقليدية على معطيات المطر والحرارة الخاصة بالحوض. وإن تعلق الأمر بالطرق التي تعتمد على المؤشرات، أو الطرق التي تعطي التوجهات أو الانقطاعات فالنتائج تصب كلها في توجه الأمطار للنقصان والحرارة للارتفاع.

في المرحلة الثانية، تم تحليل المعطيات باستعمال المويجات. واختير لذلك، مويجات مورلي، بول، دوبيشي و القبة المكسيكية. وتبين أن النتائج تؤكد في مجملها النتائج المحصل عليها بالطرق التقليدية مع دلالات أحسن فيما يخص التقلبات الدورية.

عموما، الخلاصة هي أن الطرق التي تسمح بكشف فترات الجفاف تكمل بعضها البعض والاختلافات الملحوظة تعود أساسا إلى الأدوات المستعملة من كل منهما. للإشارة، فإن طريقة المويجات تقدم مؤشرات مشجعة للمستقبل.

الكلمات المفتاحية: حوض، حمام بوغرارة، جفاف، توجه، كسر، اختبارات إحصائية، مويجات.

Liste des notations

a :	Paramètre de stationnarisation, modèle ARIMA
A_{P_i} :	Anomalie pluviométrique du mois i (Indice de Pita)
APA_i :	Anomalie cumulée du mois i (Indice de Pita)
APA_m :	Moyenne des anomalies cumulées de tous les mois de la série (Indice de Pita)
b :	Paramètre de stationnarisation, modèle ARIMA
d :	Ordre de différentiation du modèle ARIMA
D :	Déficit d'écoulement, méthode de Coutagne
d_k :	Paramètre de calcul du test de Buishand (la variance)
D_{ij} :	Somme des signes (Test de Pettitt)
D_x :	Paramètre de calcul du test de Buishand (la variance)
E_p :	Evapotranspiration potentielle
E_m :	Ecart standardisé à la moyenne
ETP :	Evapotranspiration potentielle, méthode de Tixeront-Berkaloff
ETR :	Evapotranspiration réelle, méthode de Turc
I :	Indice de chaleur, méthode de Thornthwaite
I_M :	Indice climatique de De Martonne
I_P :	Indice de pluviosité
$ISSP_i$:	Indice de Pita standardisé du mois i
j :	Indice
K :	Coefficient de correction, méthode de Thornthwaite
N :	Taille ou longueur d'une série chronologique
N_p :	Nombre de paires vérifiant une certaine condition dans le test de corrélation sur le rang
p :	Ordre de l'autorégression du modèle ARIMA
P :	Pluie ou précipitation
P_i :	Pluie ou précipitation de l'année i
P_m :	Pluie ou précipitation moyenne interannuelle
P_{MED} :	Médiane de la série pluviométrique correspondant au mois i (Indice de Pita)
q :	Constante du modèle ARIMA

R :	Ruissellement, méthode de Tixeront-Berkaloff
r_k :	Coefficient d'autocorrelation au décalage k
S_k :	Paramètre de calcul du test de Buishand (Somme des différences par rapport à la moyenne)
SPI :	Indice des précipitations normalisé (Standard Precipitations Index)
t :	Température mensuelle ou annuelle selon les cas
T :	Période de retour, température selon les chapitres
U :	Variable aléatoire centrée réduite
V :	Série chronologique
V_i :	Moyenne mobile au pas i
\bar{V}_n :	Moyenne mobile d'ordre n
W :	Paramètre du test de Wilcoxon
x :	Variable d'une série chronologique
$\overline{x_1^k}$:	Moyenne de la sous-série de i à k
$\overline{x_2^k}$:	Moyenne de la sous-série de $(k+1)$ à N
X :	Abscisse cartésienne des stations (pluviométrique ou climatique) ou série chronologique
Y :	Ordonnée cartésienne des stations (pluviométrique ou climatique)
Z :	Altitude cartésienne des stations (pluviométrique ou climatique) ou variable centrée réduite du test de Wilcoxon
α :	Risque de première espèce en cas de test statistique ou paramètre de calcul pour la méthode de Thornthwaite
β :	Coefficient de pondération, moyenne mobile
ε_t :	Perturbation aléatoire ou bruit blanc (Modèle ARIMA)
λ :	Paramètre de Calcul, méthode de Coutagne
μ :	Constante du modèle ARIMA
σ :	Ecart type
σ_{APA} :	Ecart type des anomalies cumulées de tous les mois de la série (Indice de Pita)
τ :	Variable centrée réduite
φ_i :	Paramètres de la régression (Modèle ARIMA)
χ^2 :	Le test statistique Khi-2

Liste des figures

Figure 1.1 : Les zones climatiques dans le monde.	p.5
Figure 1.2 : Les différentes zones géographiques en Algérie	p.7
Figure 2.1 : Profil en travers type du barrage	p.18
Figure 2.2 : Bassin versant du barrage Hammam Boughrara et ses affluents	p.19
Figure 2.3 : Autocorrelogramme des précipitations de la station de Maghnia	p.22
Figure 2.4 : Autocorrelogramme des précipitations de la station de Zenata	p.23
Figure 2.5 : Fluctuations des précipitations annuelles autour de la moyenne	p.23
Figure 2.6 : Ajustement des précipitations de la station de Maghnia à la loi normale	p.26
Figure 2.7 : Précipitation minimale, moyenne et maximale des précipitations mensuelles.	p.27
Figure 2.8 : Variations des températures moyennes annuelles de la station de Maghnia.	p.28
Figure 2.9 : Variations des températures moyennes mensuelles de la station de Maghnia.	p.29
Figure 2.10 : Températures mensuelles minimale, moyenne et maximale de la station de Maghnia.	p.29
Figure 2.11 : Diagramme et Indice de De Martonne de la station de Maghnia.	p.31
Figure 2.12 : Indice d'aridité mensuel de De Martonne de la station de Maghnia.	p.32
Figure 2.13 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de la station de Maghnia.	p.33
Figure 3.1 : Ecart standardisé à la moyenne de la station de Maghnia.	p.41
Figure 3.2 : Ecart standardisé à la moyenne de la station Hammam Boughrara.	p.42
Figure 3.3 : Ecart standardisé à la moyenne de la station Béni Bahdel.	p.42
Figure 3.4 : Ecart standardisé à la moyenne de la station de Zenata.	p.43
Figure 3.5 : Cumul des écarts standardisés à la moyenne des quatre stations.	p.43
Figure 3.6 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Hammam Boughrara	p.45
Figure 3.7 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Beni Bahdel	p.45
Figure 3.8 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Zenata	p.46
Figure 3.9 : Valeurs du SPI de la station de Maghnia.	p.47
Figure 3.10 : Valeurs du SPI de la station de Hammam Boughrara.	p.47
Figure 3.11 : Valeurs du SPI de la station de Béni Bahdel.	p.47

Figure 3.12 : Indice de Pita de la station de Maghnia.	p.49
Figure 3.13 : Indice de Pita de la station Hammam Boughrara.	p.49
Figure 3.14 : Indice de Pita de la station Béni Bahdel.	p.50
Figure 3.15 : Indice de Pita de la station de Zenata.	p.51
Figure 3.16 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Maghnia.	p.52
Figure 3.17 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Hammam Boughrara.	p.52
Figure 3.18 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Béni Bahdel.	p.53
Figure 3.19 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Zenata.	p.54
Figure 3.20 : Moyenne mobile appliquée à la station de Maghnia.	p.56
Figure 3.21 : Moyenne mobile appliquée à la station de Hammam Boughrara.	p.56
Figure 3.22 : Moyenne mobile appliquée à la station de Béni Bahdel.	p.57
Figure 3.23 : Moyenne mobile appliquée à la station de Zenata.	p.57
Figure 3.24 : Autocorrélogramme des pluies de la station de Hammam Boughrara.	p.63
Figure 3.25 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Hammam Boughrara	p.63
Figure 3.26 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Hammam Boughrara.	p.64
Figure 3.27 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Maghnia	p.65
Figure 3.28 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Maghnia	p.65
Figure 3.29 : Autocorrélogramme de la station de Béni Bahdel.	p.66
Figure 3.30 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Béni Bahdel	p.67
Figure 3.31 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Béni Bahdel	p.67
Figure 3.32 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Zenata.	p.68
Figure 3.33 : Autocorrélogramme des débits de Hammam Boughrara.	p.69
Figure 3.34 : Ajustement à la distribution normale des débits de la station de Hammam Boughrara	p.70
Figure 3.35 : Ajustement à la distribution Log-normale des débits de la station de Hammam Boughrara	p.70
Figure 3.36 : Ecart standardisé à la moyenne des débits de Hammam Boughrara.	p.71
Figure 3.37 : Le SRI des débits de Hammam Boughrara.	p.71
Figure 3.38 : Moyenne mobile des débits du barrage Hammam Boughrara.	p.71
Figure 3.39 : Cumul des écarts à la moyenne des débits du barrage Hammam Boughrara	p.72
Figure 3.40 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliqués aux débits du barrage Hammam Boughrara.	p.72

Figure 3.41 : Ajustement à la loi normale des températures de la station de Maghnia	p.73
Figure 3.42 : Ajustement à la loi normale des températures de la station de Zenata	p.73
Figure 3.43 : Autocorrélogramme des températures de la station de Maghnia	p.74
Figure 3.44 : Autocorrélogramme des températures de la station de Zenata	p.74
Figure 3.45 : Technique de segmentation de Hubert appliquée aux températures de la station de Maghnia	p.75
Figure 3.46 : Technique de segmentation de Hubert appliquée aux températures de la station de Zenata.	p.76
Figure 3.47 : Autocorrélogramme simple des températures de Zenata	p.79
Figure 3.48 : Autocorrélogramme simple des températures de Maghnia	p.80
Figure 3.49 : Autocorrélogramme simple des précipitations de Zenata	p.80
Figure 3.50 : Autocorrélogramme simple des précipitations de Maghnia	p.81
Figure 3.51 : Autocorrélogramme partiel des températures de Zenata.	p.82
Figure 3.52 : Autocorrélogramme partiel des températures de Maghnia.	p.82
Figure 3.53 : Autocorrélogramme partiel des précipitations de Zenata.	p.83
Figure 3.54 : Autocorrélogramme partiel des précipitations de Maghnia.	p.83
Figure 3.55 : Test de bruit blanc des températures de la station de Zenata.	p.85
Figure 3.56 : Test de bruit blanc des températures de la station de Maghnia.	p.85
Figure 3.57 : Test de bruit blanc des précipitations de la station de Zenata.	p.86
Figure 3.58 : Test de bruit blanc des précipitations de la station de Maghnia.	p.86
Figure 3.59 : Projection des températures de la station de Zenata.	p.87
Figure 3.60 : Projection des températures de la station de Maghnia.	p.87
Figure 3.61 : Projection des précipitations de la station de Zenata.	p.88
Figure 3.62 : Projection des précipitations de la station de Zenata.	p.88
Figure 3.63 : Ajustement des volumes mobilisables selon la distribution normale.	p.96
Figure 4.1 : Pavage temps-fréquence pour la transformée à fenêtre glissante.	p.101
Figure 4.2 : Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelettes..	p.102
Figure 4.3 : Comparaison entre la transformée de Gabor et la transformée en ondelettes	p.103
Figure 4.4 : Quelques bases d'ondelettes.	p.106
Figure 4.5 : Mesure du coefficient d'ondelette, exemple d'une ondelette de Morlet	p.108
Figure 4.6 : Coefficient d'ondelette et forme du signal	p.109
Figure 4.7 : L'ondelette de Morlet et le chapeau mexicain pour deux valeurs d'échelle	p.111

Figure 4.8 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Hammam Bouhrara.	p.113
Figure 4.9 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Maghnia.	p.114
Figure 4.10 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Béni Bahdel.	p.114
Figure 4.11 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Zenata.	p.115
Figure 4.12 : Ajustement polynomial des températures de la station de Maghnia.	p.115
Figure 4.13 : Ajustement polynomial des températures de la station de Zenata.	p.116
Figure 4.14 : Ajustement polynomial des apports au niveau du barrage Hammam Bouhrara.	p.116
Figure 4.15 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Morlet.	p.118
Figure 4.16 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Daubechies.	p.118
Figure 4.17 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par le chapeau mexicain.	p.119
Figure 4.18 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Paul.	p.119
Figure 4.19 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Morlet.	p.120
Figure 4.20 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Paul.	p.121
Figure 4.21 : Analyse des précipitations de la station de Maghnia par l'ondelette de Morlet.	p.122
Figure 4.22 : Analyse des précipitations de la station de Maghnia par l'ondelette de Paul.	p.122
Figure 4.23 : Analyse des précipitations de la station de Maghnia par l'ondelette de Paul.	p.123
Figure 4.24 : Analyse des précipitations de la station Béni Bahdel par l'ondelette de Paul.	p.124
Figure 4.25 : Analyse des précipitations de la station de Zenata par l'ondelette de Morlet.	p.124
Figure 4.26 : Analyse des précipitations de la station de Zenata par l'ondelette de Paul	p.125
Figure 4.27 : Analyse des apports du barrage Hammam Bouhrara par l'ondelette de Morlet.	p.126
Figure 4.28 : Analyse des apports du barrage Hammam Bouhrara par l'ondelette de Paul.	p.126

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Valeurs du test de Wilcoxon	p.24
Tableau 2.2 : Valeurs du test χ^2	p.25
Tableau 2.3 : Précipitation pour des périodes de retour données	p.26
Tableau 2.4 : Evapotranspiration selon la méthode de Thornthwaite.	p.35
Tableau 2.5 : Evapotranspiration selon la méthode de Turc.	p.36
Tableau 2.6 : Déficit d'écoulement selon la méthode de Coutagne.	p.36
Tableau 2.7 : Déficit d'écoulement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff.	p.36
Tableau 3.1 : Liste des stations pluviométriques utilisées.	p.39
Tableau 3.2 : Valeurs de SPI et état d'humidité (OMM, 2012).	p.44
Tableau 3.3 : Probabilité d'occurrence des années sèches (OMM, 2012).	p.44
Tableau 3.4 : Analyse de la tendance des températures.	p.78
Tableau 3.5 : Analyse de la tendance des précipitations.	p.79
Tableau 3.6 : Estimation des paramètres des modèles pour les températures.	p.84
Tableau 3.7 : Estimation des paramètres des modèles pour les précipitations.	p.84
Tableau 3.8 : Matrices des fréquences de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 1).	p.91
Tableau 3.9 : Matrices des probabilités de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 1).	p.91
Tableau 3.10 : Matrices des fréquences de transition des quatre stations ((Chaines de Markov d'ordre 2).	p.93
Tableau 3.11 : Matrices des probabilités de transition des quatre stations ((Chaines de Markov d'ordre 2).	p.93
Tableau 3.12 : Stations pluviométriques retenues pour l'évaluation de la pluie moyenne sur le bassin.	p.95

Liste des abréviations

O.M.M. :	Office mondiale de la météorologie
IPMED :	Institut de Prospective Economique du monde Méditerranéen
ITGC :	Institut Technique des Grandes Cultures
PNUD :	Plan des Nations Unies pour le Développement
GEIC :	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ONU :	Organisation des Nations Unies
UNESCO :	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
SIDA :	Syndrome d'immunodéficience acquise
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydriques
ONM :	Organisation Nationale de le Météorologie

Introduction générale

- **Préambule**

Parler de l'importance de l'eau pour le bien être des êtres humains aujourd'hui semble être une action inutile dans la mesure où un simple regard sur les crises alimentaires vécues en Afrique, notamment au Sahel [Bonnecase, 2010 ; Janin, 2015], en Somalie et en Ethiopie [Camberlain, 1993] dans les années 70 et 80 le rappelle cruellement. Si les dégâts ont été amplifiés par des conflits armés, la principale cause était la sécheresse qui avait sévit dans cette zone et qui avait souvent duré dans le temps. Le nombre de morts a largement dépassé le million [Medjerab, 2011].

L'Algérie, à l'image du pourtour méditerranéen du Sud, a eu sa part de cette calamité en ces temps [ITGC, 2015]. Ceci a été énormément senti par la population qui a vu l'eau de robinet se raréfier et par les agriculteurs qui ont vu leurs moyens d'irrigation diminuer [IPMED, 2006 ; PNUD, 2009]. Cette période de sécheresse a coïncidé avec la nationalisation des hydrocarbures et où les autorités se sont vues freinées dans leurs élans de développement du pays par cette conjoncture malheureuse. L'eau potable était rationnée [Buchs, 2007] et l'importation des produits agricoles pour faire l'appoint ont commencé [Bessaoud, 1994]. Cette crise de l'eau s'est aggravée suite au choc pétrolier des années 80 où les ressources financières du pays ont drastiquement diminué limitant les possibilités d'action des autorités [Preure, 1992].

Si la sécheresse a concerné tout le territoire national, c'est sa région Ouest et spécialement celle du Nord-Ouest qui a été le plus sévèrement touchée. Le bassin versant de la Tafna dont les eaux de surface servaient à approvisionner pratiquement toutes les grandes agglomérations de l'Ouest du pays a vu ses capacités de mobilisation s'affaiblir avec le temps. Ses barrages se remplissaient peu et le taux de satisfaction de la demande était faible [Touati, 2010]. Le barrage Hammam Boughrara, qui est l'un des cinq barrages du bassin versant de la Tafna, a été réceptionné en 1998, c'est-à-dire après le début de la sécheresse. Malheureusement, les chiffres donnés par les gestionnaires de ce barrage dans leurs projections sont toujours surestimés. C'est cette surestimation qui a été la cause principale du choix de cet ouvrage comme objet d'application de notre travail et pour illustrer les méthodes d'investigation utilisées dans cette thèse.

- **Genèse de la thématique**

L'intérêt pour les ressources en eau a commencé avec le Magister soutenu en 2004 et qui concernait l'évaluation des ressources en eau de surface du bassin versant de la Tafna et leurs projections sur le court et le moyen terme [Adjim, 2004]. C'est durant la préparation de ce mémoire que l'intérêt pour étudier l'impact de la sécheresse sur les ressources en eau du bassin versant de la Tafna s'est accentué [Djedid et al., 1999 ; Djedid et al., 2001]. Cet intérêt s'est poursuivi [Adjim et al., 2005 ; Djedid et Adjim, 2008 ; Adjim et Djedid, 2012, Adjim et Djedid, 2014] tout en voulant élargir le champ de recherche vers la modélisation mais toujours avec le souci d'établir des scénarios futures pour éventuellement examiner la possibilité de l'aggravation de la situation. Cette orientation du sujet a été plus ou moins freinée par les difficultés rencontrées dans l'acquisition de données fiables, variées, de longues durées et complémentaires. Entre-temps, de nombreux collègues ont traité et publié des travaux similaires se rapportant à la même thématique, c'est-à-dire la sécheresse et son impact sur les ressources en eau du bassin versant de la Tafna [Meddi H. et Meddi M., 2009 ; Ghenim et al., 2010 ; Bakreti et al., 2013 ; Ghenim et Megnounif, 2013-a ; Ghenim et Megnounif, 2013-b]. Ces travaux utilisent presque les mêmes techniques et confirment que le bassin de la Tafna subit une sécheresse depuis environ la moitié des années 70. Suite à cela, le travail a été orienté vers une investigation sur les méthodes utilisées pour caractériser la sévérité des sécheresses et leurs positionnements dans le temps. Le choix du bassin d'application est relié au fait que ce barrage ait été réalisé plusieurs années après le début de la sécheresse et que les volumes de projet et d'exploitation n'ont jamais fait l'objet de réactualisation.

- **Problématique et motivations**

Pour qu'une diminution des précipitations soit considérée comme une sécheresse, il faut que cette diminution soit significative et qu'elle dure dans le temps. Pour caractériser le début et l'ampleur des sécheresses, de nombreux indices et méthodes ont été proposés dans la littérature scientifique et dont certaines présentent des conditions limitatives d'utilisation. Des méthodes statistiques ont aussi été proposées. La problématique de cette thèse est de se poser la question suivante : Ces indices et ces méthodes sont-ils inconditionnellement utilisables, donnent-ils les mêmes pronostics, etc. ? Dans un premier temps, ce sont donc ces méthodes classiques qui seront appliquées, discutées et comparées. Dans un second temps, c'est la méthode de transformation des séries temporelles par les ondelettes qui sera prospectée. Les avantages et les limites seront présentés.

- **Organisation de la thèse**

L'organisation rédactionnelle de cette thèse a consisté en une répartition sur des chapitres progressifs et complémentaires, ceci pour arriver aux objectifs assignés à cette thèse. Ainsi, la thèse est ouverte par une introduction générale qui décrit l'importance de l'eau dans la vie sociale et économique de l'être humain et présente en même temps la problématique de ce travail.

Un premier chapitre d'ordre principalement bibliographique est consacré à décrire les grandes lignes du climat dans le monde, dans le Maghreb et en Algérie et présente surtout le débat sur la réalité du changement climatique.

Le deuxième chapitre présente le bassin versant du barrage Hammam Bouhrara et décrit le climat qui y règne. Les résultats de ce chapitre serviront surtout à mettre dans le contexte les chapitres qui suivront.

L'étude de la variabilité climatique, la détection et la caractérisation de la sécheresse est effectuée dans le troisième chapitre. Ceci est réalisé d'abord à l'aide des méthodes basées sur les indices et sur les études statistiques. Des études de projection et de persistance sont données en fin de chapitre.

Le quatrième chapitre utilise la technique de transformation des séries chronologiques par les ondelettes pour étudier la variabilité climatique et mettre particulièrement en évidence les séquences de sécheresses. Les résultats les plus significatifs illustreront cette partie.

Une conclusion générale qui présente le bilan de cette thèse est donnée en fin du document.

Chapitre 1

Climat et Changement Climatique

1. Introduction

Le changement climatique est un terme qui revient actuellement très souvent dans les discussions et les écrits. Il est parfois utilisé imprudemment pour décrire des événements ou des phénomènes qui n'ont pas forcément de lien avec lui. C'est pourquoi ce chapitre essentiellement bibliographique est réservé à la description des grandes lignes du climat dans le monde et en Algérie. Il sera ensuite question de la définition du changement climatique, ses causes et ses conséquences. La question du débat suscité entre les défenseurs du changement climatique et ses détracteurs est présentée. Enfin, une description sommaire du climat de l'Algérie avec une bifurcation sur les conséquences du changement climatique sur le Maghreb et particulièrement sur l'Algérie et sa région Nord-Ouest, objet d'étude de cette thèse, est donnée.

2. Le climat

D'après l'organisation météorologique mondiale (OMM), le climat est défini comme étant « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère » [OMM, 2011]. La variation des paramètres météorologiques que sont les précipitations, les températures, les vents, l'ensoleillement, etc. d'une saison à une autre ou d'une année à une autre fait partie du climat. Cette variation naturelle reste stationnaire à long terme.

Sur terre, le climat a énormément évolué depuis que celle-ci existe. Il est passé par plusieurs périodes glaciaires et interglaciaires. Des périodes de réchauffement et de refroidissement se sont alternées jusqu'à notre ère. La température a fluctué pour se stabiliser à partir de 5000 ans autour des valeurs actuelles [Jaques et Le Truet, 2004].

C'est le soleil et son rayonnement qui est la principale source qui conditionne le climat sur la terre. La trajectoire elliptique du mouvement de la terre autour du soleil et l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre autour d'elle-même font que les différentes parties de la terre ne reçoivent pas la même quantité de chaleur en fonction du temps. Cette différence fait que le sol, les océans et l'atmosphère ne sont plus à la même température. En conséquence, des processus d'échanges

se produisent continuellement provoquant les circulations atmosphériques et océaniques. Ces derniers sont dus au fait que la nature cherche toujours à tendre vers l'équilibre.

3. Les types de climats dans le monde

Il existe sur terre cinq grandes zones climatiques, une zone chaude de part et d'autre de l'équateur, deux zones froides aux pôles et deux zones de climat tempéré entre les zones chaudes et froides (Figure 1.1).

Le climat chaud règne de part et d'autre de l'équateur jusqu'aux lignes tropicales, le Cancer au Nord et le Capricorne au Sud. Cette zone climatique comprend le climat équatorial qui règne dans les régions voisines de l'équateur. Il est caractérisé par un climat chaud et humide. La température est souvent élevée et les précipitations abondantes. Les saisons sont quasi-absentes, la végétation y est abondante, les forêts sont denses et les cours d'eau ont des débits très élevés. En s'éloignant de l'équateur règne le climat tropical caractérisé par des températures toujours élevées mais avec moins de précipitations. Les forêts laissent la place à la savane. A la limite des lignes tropicales Nord et Sud, règne le climat désertique. C'est un climat très chaud et des précipitations presque absentes. La végétation comme la population sont très rares.

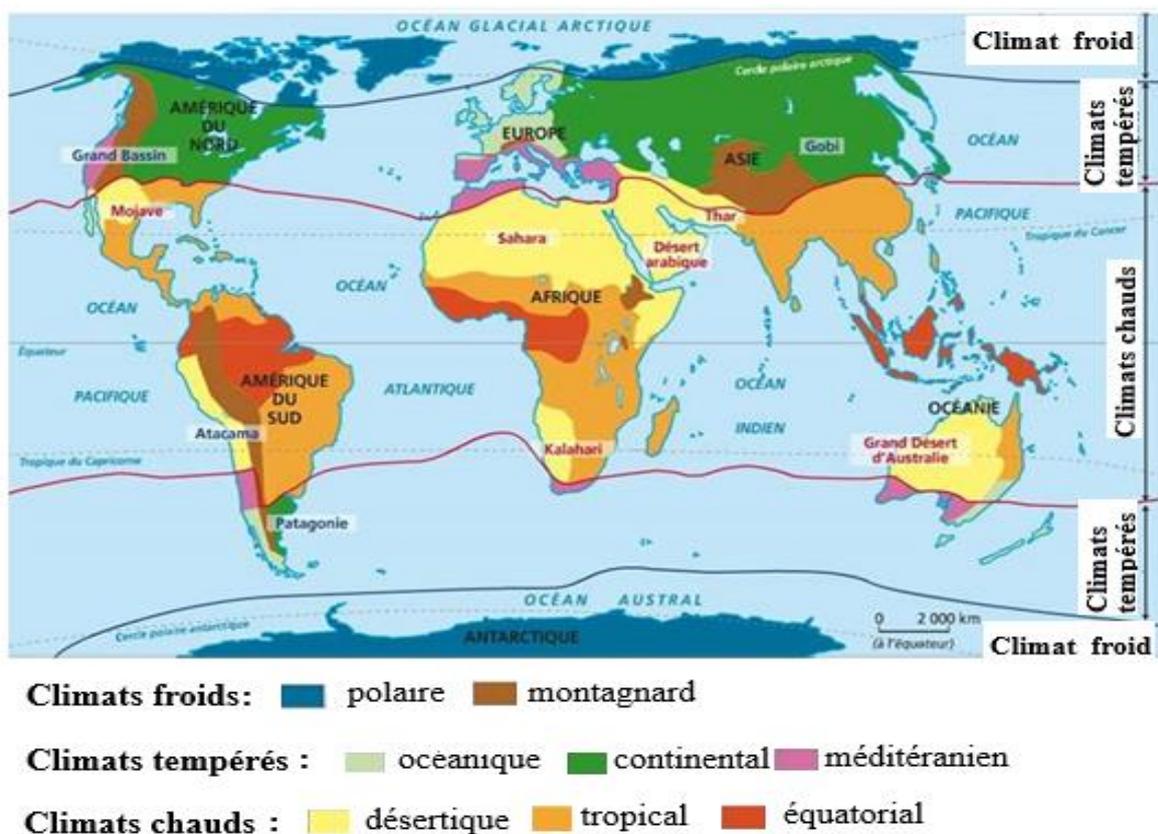


Figure 1.1 : Les zones climatiques dans le monde (repris de www.bing.com/images)

Entre les lignes tropicales et les lignes polaires règne un climat tempéré. Ce dernier est caractérisé par des précipitations et des températures pas trop élevées et par l'existence des quatre saisons : Automne, Hiver, Printemps et Été. Au sein de cette zone, règnent les climats océanique, continental et méditerranéen. Le climat océanique règne sur les façades occidentales des continents exposés à l'influence des océans. Il est caractérisé par une pluviométrie répartie sur toute l'année et des températures douces en général mais plus basses en hiver qu'en été. Le climat continental règne dans les régions éloignées du littoral. L'hiver est plus sec et plus froid et l'été plus chaud et plus humide. C'est l'amplitude entre les températures basses et les températures hautes qui est plus marquée. Le climat méditerranéen est un climat à été chaud et sec et un hiver doux et humide. Les précipitations sont beaucoup plus faibles que pour les climats océanique ou continentale. Ce climat se rencontre dans le pourtour de la mer méditerranée mais aussi en Californie, au Chili et dans quelques autres régions du monde.

La zone froide correspond au climat polaire qui règne aux pôles du globe terrestre. C'est un climat très froid où soufflent des vents violents. Les précipitations sont souvent sous forme neigeuses et tombent particulièrement en été. Les lieux extrêmes de ces pôles ont la particularité de voir « le jour et la nuit polaires ». Le jour polaire est une période pendant laquelle le soleil ne se couche pas pendant six mois. De même, la nuit polaire est une période où le soleil ne se lève pas pendant six mois.

4. Le climat en Algérie

De par sa position géographique, l'Algérie est soumise à des climats très variés (Figure 1.2). Dans le littoral Nord, il règne un climat typiquement méditerranéen avec des étés secs et chauds et des hivers tempérés et humides. Les précipitations tombent généralement en hiver et au printemps et les températures sont très élevées en été. L'Est et le Centre du pays sont beaucoup plus arrosés que l'Ouest à cause des effets écrans produits par les chaînes montagneuses du Maroc et de l'Espagne et qui limitent les effets des vents océaniques. Dans cette région, il règne un climat semi-aride avec une variabilité très marquée des précipitations.

Le Sud du pays appartient à la zone climatique chaude. C'est le Sahara, caractérisé par un climat désertique où les températures sont très élevées en été, beaucoup plus fraîches en hiver et avec une quasi-absence des précipitations. Des vents de sables sont régulièrement observés particulièrement vers la fin du printemps. La densité de la population est aussi faible dans cette région.

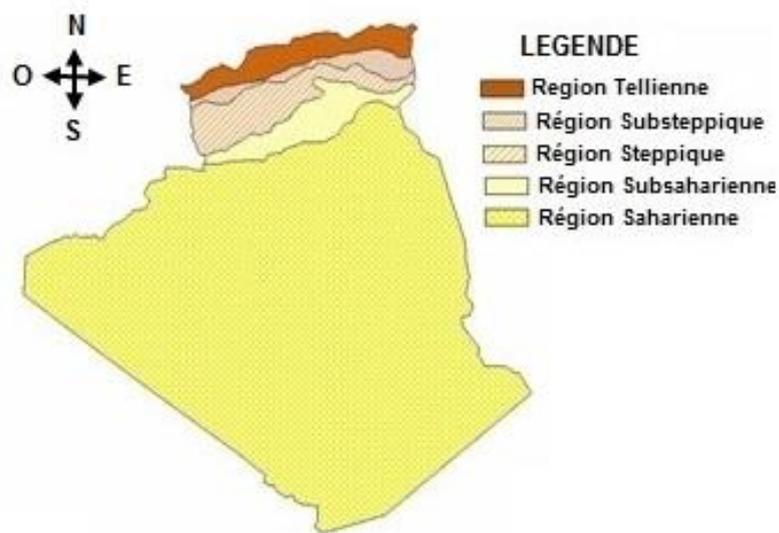


Figure 1.2 : Les différentes zones géographiques en Algérie (www.meteoalgerie.com/)

Dans les zones de transition entre le climat chaud du Sud et le climat tempéré méditerranéen du Nord, règne un climat intermédiaire, un climat steppique. Cette région s'étend entre les chaînes montagneuses du Sud, l'Atlas Saharien, et les chaînes montagneuses du Nord, l'Atlas Tellien. Les étés sont très chauds et les hivers froids et secs, les précipitations sont faibles. En hiver, le verglas est très répandu et les vents sont glaciaux.

5. Changement climatique dans le monde

5.1. Débat autour du changement climatique

Le changement climatique est défini comme étant la variation de l'état du climat par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus [GEIC, 2014]. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.

Pour être précise, la communauté scientifique parle actuellement de réchauffement climatique au lieu de changement. Ce réchauffement est, selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) institué par l'ONU pour synthétiser les études scientifiques à ce sujet, sans équivoque [GEIC, 2007]. Ce réchauffement est reconnu par la majorité des états de la planète [UNESCO, 2014] et qu'il y avait une probabilité de 5 % pour que les activités humaines ne soient pas à l'origine de la majeure partie de ce réchauffement. Ce sont surtout les

émissions des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO₂) et méthane (CH₄)) dues à l'activité industrielle qui sont jugées responsable [GEIC, 2007]. En effet, la concentration moyenne de ce dernier dans l'atmosphère mesurée entre 1995 et 2005 a progressé annuellement 9500 fois plus vite que sur les 650000 ans précédents [Salomon et all., 2007 cités par Keller et all., 2011]. Il faut noter que la combustion des énergies fossiles participe à plus de la moitié dans les émissions du gaz carbonique dans l'atmosphère. Selon l'organisation météorologique mondiale, la décennie 2001-2010 est la plus chaude qui ait été constatée depuis que les paramètres météorologiques ont commencé à être mesurés de façon systématique à partir de 1873 [OMM, 2013].

Néanmoins, il reste encore des scientifiques ou des états qui émettent des réserves sur les études publiées et les interprétations qui y sont déduites. D'abord parce que le climat de la terre a connu depuis la formation de cette dernière plusieurs fluctuations. Ensuite, parce que les mesures standardisées des variables climatiques n'ont commencé qu'à partir de la naissance de l'organisation météorologique internationale en 1873. Avant cette date, les appareils de mesure étaient peu nombreux, de qualité discutables et que les mesures n'étaient pas effectuées d'une manière normalisée [Edwards, 2012].

Des pays comme la Chine ou les Etats Unis d'Amérique se basent sur des arguments semblables pour ne pas adhérer aux diverses chartres et protocoles internationaux dans ce domaine. Ils préfèrent s'inscrire dans une logique d'atténuation des effets du réchauffement au lieu de s'attaquer à ses causes.

Ainsi en France, des scientifiques comme le Géophysicien Vincent Courtillot [Courtillot, 2016] ou le Géochimiste Claude Allègre [Allègre et Montvalon., 2010] défendent l'idée que le réchauffement climatique actuel est dû principalement à la variabilité naturelle du climat et que l'ampleur n'est pas aussi importante. Pour cela, ils réinterprètent les principaux résultats publiés par les chercheurs à leurs façons en minimisant l'effet anthropique. En Belgique, c'est le Professeur de Chimie, Istvan Marko [Marko I., 2013], qui s'est attaqué aux thèses du GEIC à travers son livre « Climat, 15 vérités qui dérangent ». Ce livre contient les mêmes thèses que celles développées par Courtillot et Allègre.

Ces scientifiques sont sévèrement critiqués par la communauté scientifique pour plusieurs raisons et dont la plus importante est liée à leurs spécialités. Aucun de ces scientifiques n'a travaillé directement sur le climat et dans la majorité des cas, leurs écrits sont de nature « grand public » dans lesquels ils se permettent des facilités majeures pour avancer des affirmations sans étaiement [Norrant-Romand, 2014 ; Merlaud, 2014].

D'une manière générale, les pays européens sont les plus réceptives à la thèse du changement climatique. Ainsi, en Norvège par exemple, le scientifique Bjorn Lomborg très critique vis-à-vis de la thèse du changement climatique a évolué dans ses positions. En effet, dans le livre « The skeptical environmentalist : Measuring the real state of the World » publié en 2001, il critique sévèrement les rapports du GIEC et estime que le sujet est secondaire par rapport aux problèmes de pauvreté, de malnutrition, de SIDA, etc. Dans le livre « Smart Solutions to Climate Change » publié en 2010, ses positions sont beaucoup plus modérées même s'il reste toujours sceptique sur l'efficacité des mesures préconisées pour limiter les émanations du gaz carbonique.

En Allemagne les mouvements écologiques ont marqué beaucoup de points notamment lors d'élection politique. Actuellement, c'est l'alarmisme de ces mouvements qui commence à agacer et ce qu'exprime le scientifique écologiste allemand Frank Uekötter dans son livre « Am Ende der Gewissheiten (la Fin des Certitudes) » publié en 2011 [Uekötter, 2011].

En Angleterre et aux Etats Unis d'Amérique, les populations sont réticentes aux thèses du changement climatique. Ceci est dû principalement à l'esprit libéral des populations qui n'aiment pas les lois restrictives limitant leur liberté et aux poids des médias faiseurs d'opinion. Ce climat de scepticisme s'est amplifié à la suite de la divulgation en 2009 de contenu de mails des membres du GEIC laissant penser à des manipulations des données pour conforter l'hypothèse du réchauffement climatique. Des hommes politiques américains ont même demandé la traduction des membres américains du GEIC devant les tribunaux [Edwards, 2012]. Il faut noter qu'en 2009, quinze scientifiques américains faisaient partie du GEIC et qu'en Angleterre, il existe même des scientifiques adeptes des thèses alarmantes concernant le climat comme James Ephraim Lovelock [Lovelock, J.E., 1979].

5.2. Les conséquences du changement climatique sur la planète

Le débat sur le changement climatique est toujours d'actualité. Même s'il reste toujours des scientifiques qui rejettent cette hypothèse, la communauté scientifique est d'accord pour affirmer que de la planète se réchauffe. Ce réchauffement qui est estimé à environ $0,8 \pm 0,2^\circ\text{C}$ s'est traduit par de nombreux effets, élévation de la température des mers et océans, fonte des glaciers, etc. [Banque mondiale, 2010].

Si la température augmente, la population mondiale reste sensible surtout à la diminution des précipitations et aux multiplications des catastrophes naturelles comme les inondations, les tempêtes et les ouragans. La diminution des précipitations impacte directement les ressources

en eau et la production agricole. Les catastrophes naturelles sont spectaculaires et attirent facilement l'attention.

Dans une synthèse, Seguin et Soussana notent que la tendance pour les précipitations est moins claire, une tendance à la hausse à l'échelle globale est même indiquée. Ainsi, une augmentation de 7 à 12 % est notée dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Par contre, la pluie a significativement diminué sur la plupart des terres intertropicales. Au niveau de l'Europe, les observations sont plus contrastées, elles font état d'un accroissement pouvant aller de 10 à 40% sur le siècle passé pour les régions du nord, en particulier en hiver, et d'une baisse significative de la pluviométrie en zone méditerranéenne [Seguin et Soussana, 2008].

Dans une étude plus ancienne, Sicoulon montre que l'Europe et l'Afrique ont subi plusieurs sécheresses durant le 20^{ième} siècle mais celle qui est la plus récente est celle qui a frappé l'Afrique de l'Ouest depuis 1968 [Sicoulon, 1989].

Ces conclusions sont partagées par Fallot et Bertini-Morini qui notent un réchauffement du climat en Suisse accompagné d'une intensification des précipitations et d'une fréquence accrue des périodes de sécheresse et d'aridité, notamment au Sud des Alpes [Fallot et Bertini-Morini, 2012].

Mais le lien entre les événements extrêmes et le réchauffement climatique n'est pas encore formellement établi. En effet, recherchant à l'échelle du territoire français d'éventuels liens entre le changement climatique et les extrêmes hydrologiques, Renard [Renard, 2006] n'a pas réussi à mettre en évidence de tendance significative à l'échelle nationale, malgré quelques relations significatives au niveau régional (dans les Alpes et le nord-est de la France).

De même, en Afrique de l'Ouest, en étudiant les extrêmes hydrologiques et en disposant de données datant de 1950 jusqu'à 2010, Pantou [Pantou, 2013] conclue qu'il y'a augmentation des intensités fortes et des séquences sèches plus longues, qu'il y'a hausse de la variabilité et des contrastes, les régions sèches deviennent plus sèches et les régions humides plus humides. Néanmoins, l'auteur juge que ses résultats ne lui permettent pas d'attribuer ces observations à la variabilité naturelle du climat ou aux signes précurseurs d'un changement climatique plus durable provoqué par le réchauffement de la planète.

D'une manière générale, de nombreuses études sur l'Afrique confirment que le continent connaît une sécheresse qui s'est installée ces trente ou quarante dernières années. Cette sécheresse s'est traduite par une diminution des précipitations et des écoulements des eaux de

surface. Une variabilité très marquée des précipitations est aussi notée [Paturel et al., 1998, Servat et al., 1998 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Lienou, 2007 ; Yao et al., 2012].

Si la diminution des précipitations et la multiplication et l'allongement des périodes sèches semblent être logiquement liées au réchauffement climatique, d'autres conséquences sont souvent citées dans littérature alors que le lien n'est pas formellement établi, les inondations urbaines est un exemple [Sene et Ozer, 2002 ; Hangnon, 2015 ; Adjim et al., 2018].

Pour les feux de forêts, il semble qu'ils sont surtout corrélés aux périodes sèches dans les régions à climat semi-aride où ces périodes sont de longues durées. La sécheresse et les fortes chaleurs dessèchent la végétation et favorisent le déclenchement et la propagation des feux. Ainsi, les feux les plus spectaculaires qui ont eu lieu durant le passé récent ont eu lieu spécialement dans le pourtour méditerranéen de l'Europe et du Moyen Orient ainsi qu'en Californie [FAO, 2011].

6. Le changement climatique au Maghreb

6.1. Impact du changement climatique sur le Maroc

Le Maroc comme tous les pays du pourtour méditerranéen subit les effets de la sécheresse qui règne sur la région depuis quelques temps. A cause de sa position dans le Nord-ouest du continent africain et son exposition à l'influence de l'atlantique, la variabilité de son climat est grande. En plus, sa géographie particulière et notamment la présence et l'orientation des chaînes montagneuses de l'Atlas et du Rif accentuent cette variabilité.

Lors d'une étude menée en utilisant les données d'une vingtaine stations bien réparties sur le territoire marocain et s'étalant sur au moins une quarantaine d'années, Filahi et al. [Filahi et al., 2015] montrent que globalement le climat du Maroc est à la hausse concernant la température. Presque toutes les stations utilisées dans cette étude indiquent que le nombre de jours et de nuits froids diminue alors que celui relatif aux nuits et jours chauds augmente. Concernant les précipitations, bien que la variabilité soit grande entre les saisons et entre les régions, la tendance n'est pas nette. Les régions dans le Nord-ouest voient même une tendance à la hausse des précipitations. Ceci est confirmé pour la région du Gharb, région au Nord-est de Rabat [El Jihad et al., 2014].

Dans les régions intérieures, orientales ou du Sud, le diagnostic est sans équivoque. Pour la région d'Essaouira par exemple, sur la période allant de 1940 à 2010, il y'a eu une rupture en 1997 en ce qui concerne les séries de pluies et le déficit est de 12%. Pour les températures, la

rupture est signalée en 1993 et que l'augmentation entre les deux périodes est de 1,5°C. A cause de la sécheresse, la nappe phréatique s'est considérablement affaiblie du fait de la surexploitation [Bahir et al., 2016].

Dans les régions du Moyen Atlas, la sécheresse est persistante. En effet, en se basant sur les données d'une dizaine de stations pluviométriques dont les enregistrements s'étalent entre 1975/1976 et 2000/2001, Elbouqdaoui et al. [Elbouqdaoui et al., 2006] trouvent que dans le bassin de Srou (Maroc central), les deux tiers de ces années sont soit sèches soit très sèches. El Garouani et Tribak [El Garouani, Tribak, 2006] montrent que pour le bassin de l'Oued Inaouène (Région de Taza), le climat est marqué par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes des précipitations. Une tendance à la baisse très significative débute en 1980. Pour le bassin d'Oum Rbia (Moyen Atlas), Joulil et al. [Joulil et al., 2013] estiment que la région subit une sécheresse sévère. En effet, sur la base de l'analyse des données d'une dizaine stations pluviométriques et de cinq stations de températures s'étalant de 1975/1976 à 2008/2009, il est noté qu'une année sur deux est sèche et que la majorité des années sèches sont relatives à la période récente. La tendance générale de la pluie est à la baisse et les températures et l'évapotranspiration à la hausse. Pour la région orientale, Driouech [Driouech, 2010] a montré que les précipitations et les débits du bassin d'Oued Moulouya (Maroc Est) présentent sur la période 1956-2000 une tendance à la baisse alors que l'évapotranspiration potentielle (ETP) présente une tendance à la hausse.

La sécheresse et la diminution des précipitations impactent directement la production agricole. En effet, au Maroc, 85% des terres cultivant les céréales se basent uniquement sur la pluie. Barakat et Handoufe [Barakat et Handoufe, 1997] ont étudié la relation qui pourrait exister entre les précipitations et la production des céréales au niveau national. Sur une période allant de 1940 à 1995, ils notent une corrélation significative entre la baisse de la production des céréales et les sécheresses pluviométriques constatées. Ils notent que sur la période totale, une année sur cinq est sèche. Pour les années postérieures à 1980, c'est deux années sur cinq qui sont sèches. Benaouda et Balaghi [Benaouda et Balaghi, 2009] notent que les sécheresses ont touché les pluies de printemps empêchant la croissance et le développement des cultures donnant des productions faibles et de mauvaises qualités.

6.2. Impact du changement climatique sur la Tunisie

La Tunisie est située au Nord du continent africain. Elle subit aussi les effets de la sécheresse et de la variabilité climatique qui a caractérisé les régions intertropicales ces dernières années.

La géographie du pays fait que les précipitations dans le Sud, région quasiment désertique, sont rares. Dans cette région, il a été difficile de mettre en évidence l'évolution récente du climat à travers les précipitations [Ferchichi, 1996]. Par contre, une étude assez complète basée sur les enregistrements de la pluie de 24 stations relativement bien réparties sur le pays [Touati et al., 2017] a montré que le pays a connu des sécheresses récurrentes dans le passé. Les données qui s'étalent de 1900 à 2015 font ressortir que c'est la région Nord et la région Centre qui souffrent le plus de la persistance de la sécheresse. Cette étude a aussi montré que les isohyètes migraient de plus en plus vers le Nord indiquant une diminution globale des précipitations sur le pays. Cette variabilité est très accentuée et y est orientée plutôt de l'Est vers l'Ouest avec des cycles pluriannuels de plus en plus longues [Ben Othman et al., 2017]. Pour la région de Béja (Nord-Ouest de la Tunisie), c'est plutôt le retour de la pluie qui est noté [Chebil et al., 2011]. En effet, en analysant des séries de pluies de la région, il est noté une augmentation des précipitations lors de la décennie 2000-2009 par rapport à la période 1985-1999 mais ils notent en même temps, l'augmentation des écarts à la moyenne lors de cette même décennie. Ce qui est attribué à l'impact du changement climatique.

Pour les régions de Sousse (Littoral Est) et de Kairaouan (Centre), la diminution des précipitations annuelles a conduit à l'installation de tendances sèches de plus en plus étendues et de plus en plus fréquentes surtout lors de la période 2000-2015 par rapport aux années 1986-1999 [Chebil et al., 2009].

Les sécheresses se sont aussi traduites par moins d'écoulements superficiels et par des prélèvements excessifs sur les nappes phréatiques pour combler les besoins en eau potable et pour l'agriculture. Ceci a conduit à l'abaissement du niveau de ces dernières [Kingumbi, 2006].

6.3. Impact du changement climatique sur l'Algérie

Parmi les pays du Maghreb, l'Algérie semble être le pays le plus vulnérable vis-à-vis de la sécheresse et du changement climatique. Le pays arrivait difficilement à couvrir les besoins en eau potable de la population, ce qui l'a contraint à s'orienter vers une politique de dessalement de l'eau de mer [Kettab, 2001]. La centaine de barrages qui mobilise les eaux de surfaces se remplissaient mal et font face à un envasement continu, une évaporation excessive et des fuites non négligeables [Remini et al., 2009 ; Touati, 2010]. Ce faible taux de remplissage est dû essentiellement à une sécheresse qui s'est installée dans le pays depuis la fin des années 70. Ce constat est confirmé par de nombreuses études publiées dans la littérature scientifique. Se basant sur 102 stations pluviométriques réparties sur le Nord du pays et s'étalant de 1936 à 2009, Taïbi

et al. [Taïbi et al., 2013] montrent que tout ce territoire a vu ses précipitations chuter à partir du début des années 70. Le pourcentage de chute varie de 16% à 42% en fonction de la région d'appartenance de la station. Quant aux températures, elles ont connu une augmentation de l'ordre de 0,5°C à partir des années 80. Ce résultat est confirmé par Ghenim et Megnounif en utilisant moins de stations mais pour une période plus longue, de 1914 à 2009 [Ghenim et Megnounif, 2013].

A l'Est du pays, Khoualdia et al. [Khoualdia et al., 2014 ; Khoualdia, 2015], en étudiant le bassin du cours d'eau de Medjerda, ont mis en évidence une variabilité climatique caractérisée par une alternance de phase humide et de phase sèche. La décennie des années 70 est jugée humide, les décennies 80 et 90 sont plutôt sèches. Un retour des précipitations est noté à partir de la décennie 2000. Le déficit pluviométrique s'est traduit par une baisse importante de l'écoulement de la Medjerda. Cette baisse est due principalement à la diminution des pluies de printemps et plus particulièrement celles de l'hiver. Dans cette même étude, les températures et l'évapotranspiration présentent des tendances à la hausse, les pluies et les débits présentent des ruptures mais décalées dans le temps. Pour le bassin de Seybousse, Balah et Amarchi [Balah et Amarchi, 2016] arrivent aux mêmes conclusions à quelques nuances près. Sachant que le cours d'eau prend naissance près de Guelma pour se jeter en Méditerranée près d'Annaba, les ruptures sont décelées au Nord. Au Sud, une bonne partie des stations pluviométriques présentent des tendances à la hausse.

Dans le centre du pays, Chourghal a étudié les régions d'Alger et de Bordj Bou Arreridj [Chourghal, 2016]. Les précipitations présentent une tendance à la baisse alors que les températures présentent une tendance à la hausse. La variabilité des précipitations est très forte avec une augmentation des pluies à l'automne et une diminution au printemps, ce dernier devenant de plus en plus sec. Ces modifications ont une incidence directe sur le rendement des cultures particulièrement celle du blé.

Dans l'Ouest du pays, la sécheresse a été plus persistante et plus sévère. Les diverses études le montrent. Medejerab et Henia [Medejerab et Henia, 2011] ont sélectionné 11 stations pluviométriques réparties sur tout le Nord-Ouest du pays. Les séries de données qui s'étalent de 1915 à 1990 présentent 50% d'années sèches ou très sèches. En réalisant des représentations des pluies par décades, les auteurs notent que les isohyètes migrent de plus en plus vers le Nord indiquant une diminution globale des précipitations. Ces résultats sont confirmés par Meddi H. et Meddi M. [Meddi H., Meddi M., 2009] qui ont utilisé 26 stations qui s'étalent sur 64 ans

(1940/1941 – 2003/2004). Parmi ces stations, certaines présentaient des tendances à la hausse à la fin du 20^{ème} siècle.

Du côté de Chlef, Hallouz et al., [Hallouz et al., 2018] ont étudié le bassin de Oued Mina, affluent de Oued Cheliff. Ils notent que la variabilité des précipitations et des débits est très forte. Les tests statistiques font ressortir une rupture dans les séries des précipitations vers l'année 1976 avec des diminutions de l'ordre de 20%. La rupture dans les séries des débits est notée vers l'année 1980. Les années récentes ne montrent pas de tendance nette. Ces mêmes conclusions s'appliquent au bassin de Macta. En effet, sur la période 1976-2002, les lames d'eau écoulées annuelles moyennes sont de 28% à 36% plus faibles que sur la période 1949-1976. Les valeurs moyennes des précipitations se révèlent plus faibles pour toutes les saisons, mais les écoulements sont peu ou pas diminués en automne [Meddi et al., 2009].

Pour le bassin versant de la Tafna, qui est situé au Nord-Ouest du pays, les études sont nombreuses et les conclusions vont toutes dans le même sens, c'est-à-dire une sécheresse qui s'est installée dans la région depuis la moitié des années soixante-dix. Pour Ketrouci et Meddi [Ketrouci et Meddi, 2013], les diminutions des précipitations ont débuté au milieu des années 70 et ont atteint 40%. Les débits ont chuté à partir de 1981. Ghenim et al. [Ghenim et al., 2010] ont étudié la partie du bassin drainée par le barrage Béni Bahdel. Les conclusions sont semblables, c'est-à-dire une diminution des précipitations vers 1974/1975 dans une proportion de 27% qui a donné une diminution des écoulements de 69%. Dans le bilan hydrologique, c'est l'évapotranspiration qui prédomine.

D'autres études complètent ces constatations. Hirche et al. [Hirche et al., 2007 ; Belala et Hirche, 2013] ont sélectionné des stations réparties dans des régions sahariennes, présahariennes et dans le Sud Oranais et dont les séries s'étalaient toutes du début du siècle jusqu'à l'année 2003/2004. Les stations des régions sahariennes et présahariennes n'ont pas présenté de tendance significative malgré l'alternance des périodes sèches et des périodes humides. Par contre, les stations du Sud Oranais ont toutes présenté une diminution nette des précipitations particulièrement lors des trois dernières décennies.

D'autres conséquences peuvent être imputées à la sécheresse du bassin versant de la Tafna, l'échec de l'aménagement Souani en est un. C'est un aménagement hydraulique dont l'étude s'est basée sur une mobilisation des eaux par le barrage Béni Bahdel très favorable. Or, après la sécheresse des années soixante-dix, le projet n'a pas été achevé et n'est jamais rentré en service [Adjim et al., 2013].

7. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été surtout question de montrer à travers une synthèse bibliographique que le changement climatique est maintenant une réalité admise par la presque totalité de la communauté scientifique mondiale. Si ce changement est parfois remis en question, ses effets sont perceptibles dans le monde entier.

La cause principale de ce réchauffement est l'effet de serre que provoque le gaz carbonique émis principalement par la combustion des énergies fossiles. En fait, la présence du gaz carbonique dans l'atmosphère est nécessaire pour maintenir une certaine chaleur sur terre convenable à la vie. Mais après la révolution industrielle, la concentration de ce gaz dans l'atmosphère a augmenté avec une vitesse très forte par rapport à l'évolution antérieure.

Plus concrètement, ce réchauffement s'est traduit par une variabilité très marquée de la température et des précipitations dans divers endroits de la terre avec des amplitudes différentes dans le temps et dans l'espace.

Sur l'Algérie, l'impact de ce changement a été sévèrement senti, surtout en ce qui concerne les pluies et ce qui en découle sur les écoulements de surface. Une sécheresse a touché pratiquement tout le territoire national avec une gravité particulière pour la région Nord-Ouest du pays. Le bassin versant de la Tafna qui servait dans un passé récent de réservoir pour tout l'Ouest du pays a vu ses barrages se remplir de moins en moins. Pour illustrer les résultats de cette thèse, c'est un barrage de ce bassin, le barrage Hammam Boughrara, qui va servir d'objet d'application.

Chapitre 2

Etude climatique

du bassin du barrage Hammam Boughrara

1. Introduction

Les barrages sont réalisés en Algérie principalement pour mobiliser les eaux de surface. Ces dernières dépendent de la taille des bassins drainés mais aussi et dans de grandes proportions des précipitations et des conditions climatiques et hydrométéorologiques qui y règnent. Ce chapitre est donc consacré à la description générale du climat qui règne au sein du bassin du barrage Hammam Boughrara. Après un bref aperçu sur la genèse du barrage et une description sommaire du bassin, c'est le climat qui règne au sein de ce bassin qui est abordé. Pour cela, des vérifications nécessaires seront effectuées sur les données pour qu'elles puissent être utilisées pour étudier le climat de la région. Enfin, l'évaporation et le ruissellement seront examinés en fin de chapitre.

2. Genèse du projet du barrage Hammam Boughrara

Depuis environ la moitié des années soixante-dix, l'Algérie souffre d'un déficit important en matière de ressource en eau et particulièrement sa région Nord-Ouest. Pour faire face à ce problème, les autorités ont initié une politique volontariste qui consistait à mobiliser toutes ressources possibles. Dans la région Nord-Ouest, c'est le bassin versant de la Tafna qui allait être sollicité pour recevoir un quatrième barrage après les trois autres déjà en exploitation (Béni Bahdel, Mefrouche et El Izdihar) : C'est le barrage Hammam Boughrara qui va être réalisé dont la mise en eau a eu lieu le 11 novembre 1998. Un cinquième barrage sera réalisé plus tard, celui de Sikak (Mis en service en 2004).

Le barrage qui sera réalisé en remblai avec un évacuateur de crue latéral est doté d'une capacité de 177 Mm^3 et régularisera annuellement 59 Mm^3 . L'étude prévoit une répartition de ce volume entre la ville d'Oran et de Maghnia. Ainsi, Oran et Maghnia recevront respectivement 33 Mm^3 et 17 Mm^3 pour renforcer l'alimentation en eau potable. Un volume de 9 Mm^3 est réservé pour la valorisation des terres agricoles du périmètre de Maghnia [Rouissat, 2016].

3. Présentation du barrage Hammam Bouhrara

Le barrage Hammam Bouhrara est un barrage en remblai à noyau central en argile (T1). Des recharges en graviers roulés sont placées de part et d'autres de ce noyau (T2 et T3). Des filtres et des drains sont disposés aux endroits adéquats pour faciliter le drainage des eaux d'infiltration et baisser les pressions interstitielles. Un batardeau est implanté à l'amont et intégré dans le corps du barrage. Une recharge est placée en amont du barrage et servira comme butée et comme dissipateur d'énergie des eaux d'infiltration. Le profil en travers type est donné sur la figure 2.1 ci-après [Smail, 2014].

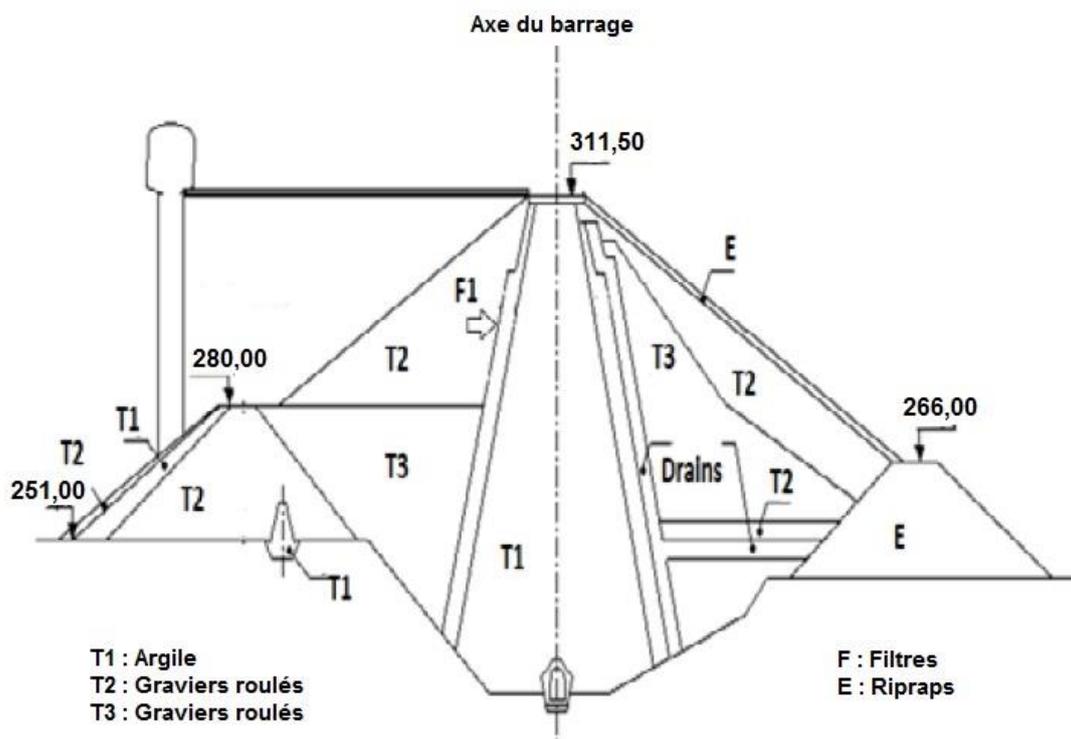


Figure 2.1 : Profil en travers type du barrage [Tractebel in Smail, 2014].

Le barrage est muni d'un évacuateur de crue type déversoir placé du côté droit avec un coursier de 550 m qui se termine par un saut de ski. Cet évacuateur est dimensionné pour évacuer la crue centennale ($3000 \text{ m}^3/\text{s}$). Un évacuateur fusible en remblai est réalisé toujours du côté droit en cas où l'évacuateur principal se retrouve dépassé [Smail, 2014].

Le barrage est équipé de dispositifs de contrôle qui permettent de suivre le comportement du barrage durant son exploitation. Plusieurs profils ont été définis dès le départ et dans lesquels ces dispositifs ont été incorporés. Ainsi, les pressions interstitielles, les niveaux piézométriques, les tassements et les déformations sont régulièrement contrôlés [Smail, 2014].

4. Présentation du bassin du barrage Hammam Bouhrara

4.1. Hydrographie du bassin du barrage Hammam Bouhrara

Le bassin versant du barrage Hammam Bouhrara représente la partie Ouest du bassin versant de la Tafna. Il draine principalement les eaux de Oued Mouillah et ses affluents. Ce dernier, long de 124 km, prend naissance dans la région d'El Abed en Algérie à 1250 m d'altitude. En rentrant au Maroc, il prend le nom de Oued El Himer. Ce dernier est rejoint au Nord de Oujda (Maroc) par Oued Isly pour rentrer en Algérie sous l'appellation de Oued Bounaim. En Algérie, l'Oued contourne Maghnia par le Nord sous le nom de Oued Mouillah et rejoint le barrage. Le bassin alimentant le barrage Hammam Bouhrara est situé dans sa majorité dans le territoire marocain. La figure 2.2 résume ces détails.

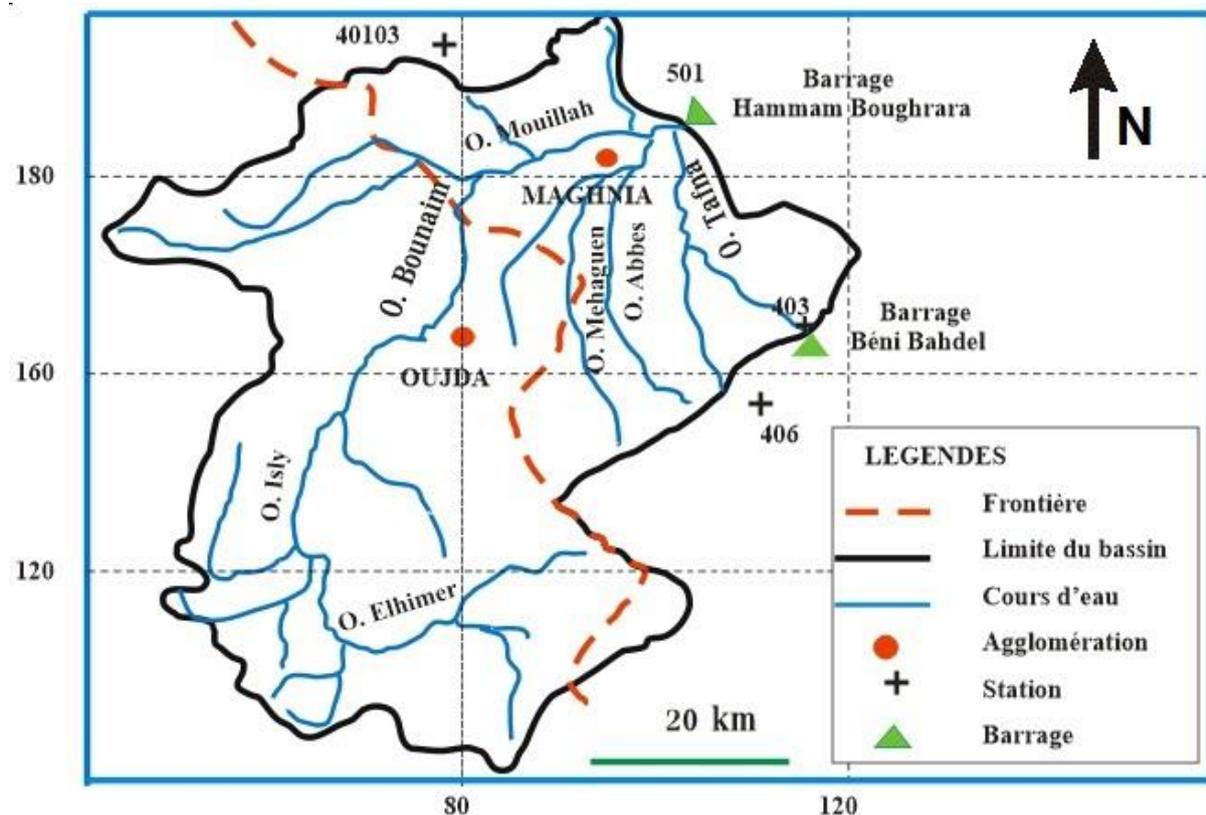


Figure 2.2 : Bassin versant du barrage Hammam Bouhrara et ses affluents.

Le côté Sud-est du bassin draine les eaux de Oued Ouardefou aux environs de Maghnia. Ce dernier est alimenté par ses affluents qui sont Oued Mehaguène, Oued Aouina et Oued El Abbès. Ces deux derniers Oueds sont souvent à secs en dehors des saisons pluvieuses.

Le barrage est alimenté aussi par Oued Tafna, du moins la partie qui se trouve en aval du barrage Beni Bahdel.

Les apports annuels de Oued Mouillah représentent environ les 4/5 des apports enregistrés au niveau du barrage Hammam Bouhrara.

4.2. Morphométrie et géographie du bassin du barrage Hammam Bouhrara

La superficie du bassin versant du barrage Hammam Bouhrara est de 2950 km² alors que le périmètre est de 374 km, ce qui lui donne une forme plutôt allongée (Coefficient de Gravelius de 1,93). C'est aussi un bassin bien drainé car le chevelu hydrographique est très dense.

La pente du bassin est variable, de l'ordre de 20% dans les montages, elle diminue jusqu'à presque 0% dans les plaines.

Le secteur d'étude présente un relief assez varié. Les monts de Tlemcen limitent le bassin du côté Sud. Ces derniers se prolongent au Maroc par la chaîne montagneuse de Jerrada. Du côté Nord, c'est les monts des Traras qui le bordent et qui se prolongent au Maroc par la chaîne de montagne Beni Izhnassen. Les zones montagneuses et les piémonts représentent environ 30% de la surface du bassin.

Au milieu de ces chaînes montagneuses s'ouvre un couloir de plateaux. Ces derniers représentent environ 60% de la superficie du bassin. Ainsi, les plaines commencent à partir du bassin de Oued Isly à l'Ouest de Oujda, s'étendent sur les plaines de Oujda qui entourent la ville à l'Est et Nord-est et se projettent sur les plaines de Maghnia. Du côté Nord de Oujda, les plaines d'Angad se prolongent en Algérie par les plaines des Béni Ouassine, ces derniers faisant partie des plaines de Maghnia coté Nord-ouest de la ville.

Les dépressions et les vallées représentent 10% de la superficie du bassin. La plus importante de ces vallées est celle de la moyenne Tafna. Cette dernière s'étend sur une longueur de 8 km, avec une largeur qui varie entre 200 et 1000 m. Oued Mouillah, qui est son principal affluent, présente un relief plus ou moins accidenté avec une topographie diminuant du Sud-ouest vers le Nord-est et une altitude moyenne de 400 m.

5. Etude climatique du bassin du barrage Hammam Boughrara

5.1. Introduction

Le comportement d'un bassin versant dépend essentiellement du climat qui y règne et spécialement des précipitations et des températures. D'ailleurs, c'est sur la base de l'étude de ces variables que les climats sont caractérisés. La partie qui va suivre ne sort pas de ce cadre puisqu'elle est réservée à l'étude du climat du bassin du barrage Hammam Boughrara.

5.2. Etude des précipitations

5.2.1. Aperçu sur les données

Les données climatiques (précipitations et températures) utilisées dans ce travail proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H.) et l'Office National de Météorologie (O.N.M.). Plusieurs séries de mesures des précipitations ont été mises à disposition. Pour l'étude climatique, seules les données des stations de Maghnia et de Zenata seront utilisées car elles sont les seules pour lesquelles les précipitations et les températures sont disponibles.

Pour qu'une série de mesures soit exploitable, il faut que les données obéissent à certains critères. Le premier de ces critères est que la durée des observations soit suffisamment longue pour qu'elle puisse représenter le climat de la région. L'Organisation Mondiale de la Météorologie (O.M.M) recommande dans ce cas à ce que la durée des observations ne soit pas inférieure à trente ans. Les deux stations citées ci-dessus vérifient ce critère pour les précipitations et pour les températures.

Dans la partie relative à l'évaluation de la lame ruisselée et qui sera donnée dans la fin du chapitre 3, certaines stations utilisées ne respectent pas cette condition. Des extensions seront effectuées à l'aide des techniques appropriées. Les détails seront donnés dans la partie qui sera consacrée à cette étude.

La deuxième condition à vérifier est celle de s'assurer si les mesures (précipitations ou températures) ont un caractère aléatoire ou pas. Plusieurs tests statistiques permettent d'identifier ce caractère mais sont la plupart du temps incapables de dire dans le cas contraire si la série présente une tendance ou une périodicité. D'autres tests statistiques ont été mis au point et permettent justement d'identifier la présence d'une tendance ou d'une périodicité.

5.2.2. Vérification du caractère aléatoire des observations

Pour vérifier le caractère aléatoire des deux séries, le test de corrélation sur les rangs ainsi que le coefficient d'autocorrélation seront utilisés. Les détails relatifs à ce test et ce coefficient seront donnés dans le chapitre suivant.

Pour ce qui est de l'application de ces procédures, les résultats sont les suivants :

- Pour la série de la station de Maghnia, l'hypothèse nulle du test de corrélation sur le rang a été acceptée, les données présentent donc un caractère aléatoire. Ce résultat est confirmé par le coefficient d'autocorrélation représenté sur la figure 2.3 ci-dessous et dont la majorité des points représentatifs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.
- Pour la série de la station de Zenata, l'hypothèse nulle a été rejetée, les données ne sont donc pas aléatoires. Ce résultat est aussi confirmé par le coefficient d'autocorrélation représenté sur la figure 2.4 ci-après et dont la majorité des points représentatifs sont à l'extérieur de l'intervalle de confiance.

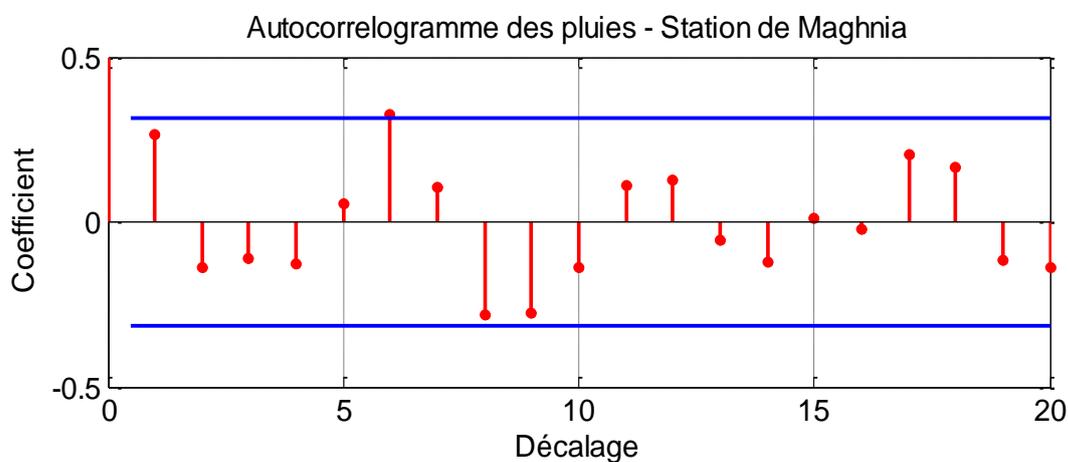


Figure 2.3 : Autocorrélogramme des précipitations de la station de Maghnia.

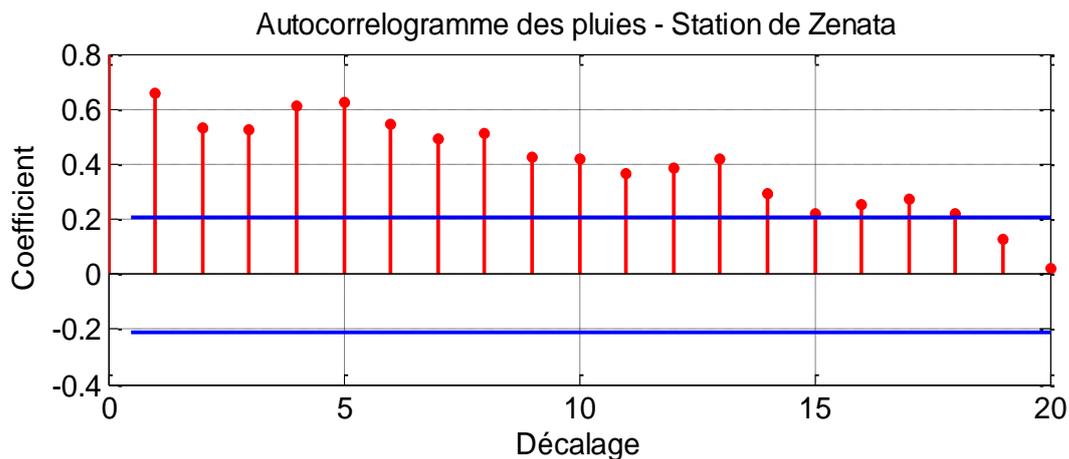


Figure 2.4 : Autocorrélogramme des précipitations de la station de Zenata.

Seule donc la station de Maghnia sera utilisée dans ce chapitre pour caractériser le climat. La station de Zenata sera utilisée dans le troisième chapitre quand il s'agira d'étudier l'existence de tendances et de ruptures dans les séries pluviométriques de la région.

La figure 2.5 ci-dessous représente la variation des précipitations moyennes annuelles de la station de Maghnia. Elle montre que la courbe se trouve en majorité sous la moyenne indiquant l'existence plus d'années sèches que d'années humides.

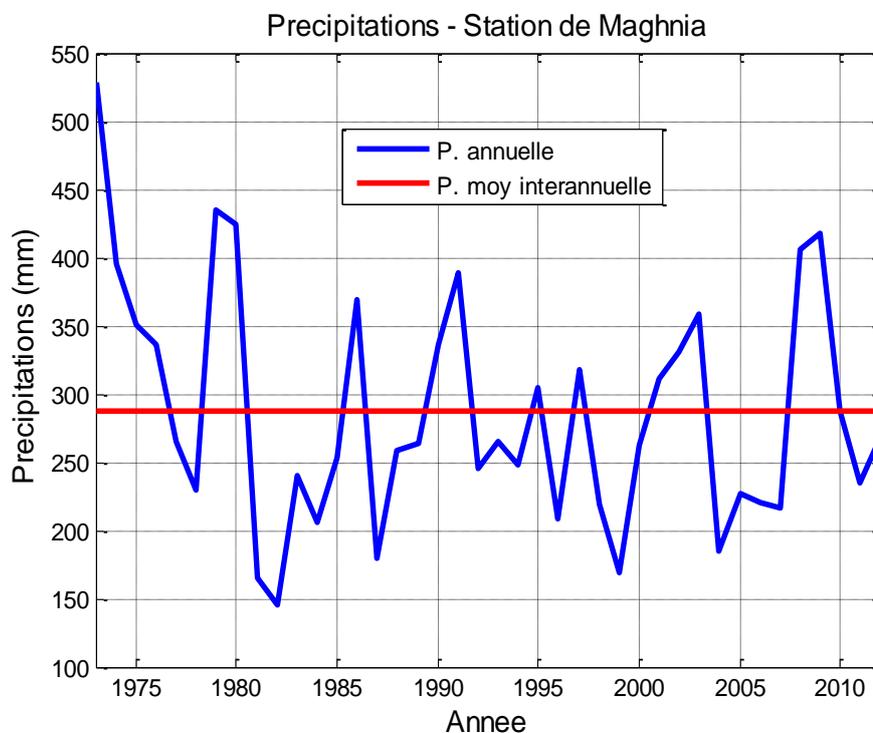


Figure 2.5 : Fluctuations des précipitations annuelles autour de la moyenne (1973/1974 à 2012/2013).

5.2.3. Vérification de l'homogénéité des données de la station de Maghnia

Plusieurs tests statistiques permettent de vérifier l'homogénéité d'une série chronologique. Le test de Wilcoxon sera utilisé ci-après. Celui-ci étant non paramétrique, il est réputé pour être robuste. Son application est très simple :

1. La série de données de taille N est prise dans son état puis divisée en deux sous-séries N_1 et N_2 de telle façon à ce que :

$$N_1 \leq N_2$$

Avec

$$N = N_1 + N_2$$

2. Reprendre la série d'origine et la classer dans un ordre croissant.
3. Affecter un rang à chaque observation. Le rang est la position de l'observation dans la série classée.

La série est homogène selon ce test si la somme des rangs de la sous-série N_1 obéit à la règle suivante :

$$W_{min} \leq W_x \leq W_{max}$$

$$W_x = \sum_{i=1}^{N_1} Rang(N_1)$$

$$W_{min} = \frac{(N_1 + N_2 + 1)N_1 - 1}{2} - Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}}$$

$$W_{max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{min}$$

$Z_{1-\alpha/2}$ est la variable de la loi normale centrée réduite. Pour un seuil de confiance de 95% :

$$Z_{1-\alpha/2} = 1,96$$

La série de Maghnia est donc homogène puisque l'application de ce test a donné les résultats suivants :

N	N₁	N₂	W_x	W_{min}	W_{max}
40	16	24	341	256,5	399,5

Tableau 2.1 : Valeurs du test de Wilcoxon

5.2.4. Adéquation des précipitations avec une loi de distribution

La recherche d'une loi de distribution permet de déterminer les pluies dont les périodes de retour sont fixées. L'adéquation d'une série avec une loi de distribution suppose la vérification de certains tests. En présence d'un grand nombre de données, il y'a de fortes chances à ce que ces données s'ajustent facilement à une loi normale (gaussienne), cette dernière est souvent qualifiée de la loi des grands nombres (en taille pas en valeur). La série des précipitations de Maghnia sera donc soumis au test χ^2 pour s'assurer que les données s'adaptent à la loi normale.

Le test χ^2 consiste à diviser la série en classe et de comparer le test χ^2 calculé au χ^2 tabulé.

N° des classes	Limites des classes	Effectif observé	Effectif théorique	χ^2
1	> 210	7	7,52	0,04
2	210 - 250	9	5,90	1,63
3	250 – 290	8	7,15	0,10
4	290 - 400	11	15,58	1,34
5	< 400	5	3,86	0,34
Total				3,45

Tableau 2.2 : Valeurs du test χ^2

Dans notre cas et pour un seuil de confiance de 95% :

$$ddl = 5 - 2 - 1 = 2$$

$$\chi_{tabulé}^2 = 5,991$$

La loi normale est acceptée comme loi de distribution des précipitations de la station de Maghnia puisque :

$$\chi_{tabulé}^2 = 5,991 > \chi_{calculé}^2 = 3,45$$

La représentation graphique du nuage de points ainsi que la droite de Henry sont données sur la figure suivante.

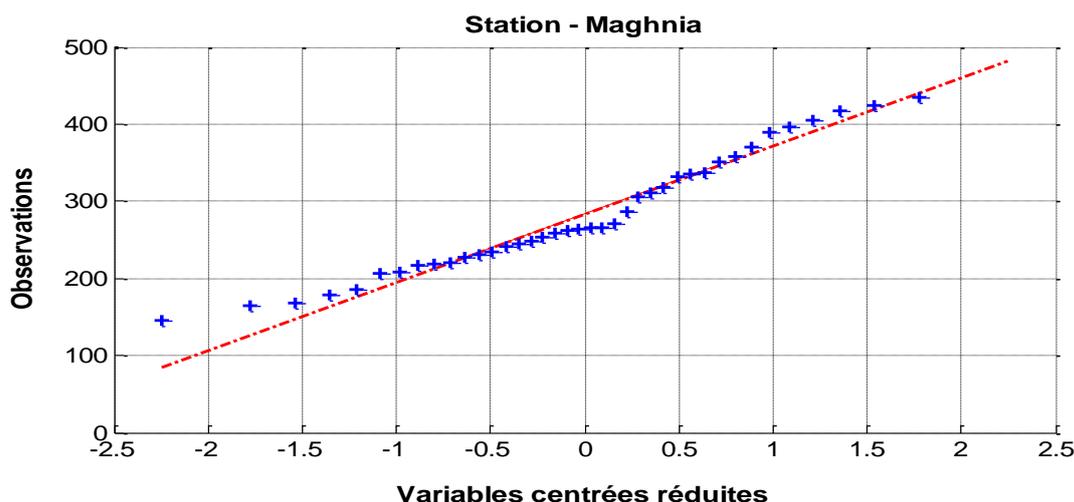


Figure 2.6 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Maghnia

La droite de Henry représentée ci-dessus permet de calculer les pluies dont les périodes de retour est fixée. A titre d'exemple, le tableau 2.3 ci-dessous donne les valeurs de la pluie pour des périodes de retour données.

Période de retour	(ans)	10	25	50	100
Pluie	(mm)	398,2	439,0	465,3	489,0

Tableau 2.3 : Précipitation pour des périodes de retour données

La droite de Henry peut aussi servir de déterminer à quelle période de retour une pluie enregistrée correspond-t-elle ?

A titre d'exemple, le point qui se décale sur le graphique de la figure 2.6 et dont la valeur est de $P = 528,4 \text{ mm}$ correspond à une période de retour de $T = 368 \text{ ans}$.

L'ensemble des valeurs concernant les caractéristiques climatiques de la région de Maghnia et notamment les moyennes des précipitations et des tendances sont souvent rencontrées dans la bibliographie avec quelques nuances dues principalement à la taille de la série prise en compte pour réaliser l'étude [Baba Hamed, 2006].

5.2.5. Irrégularité des précipitations dans le temps

L'étude des précipitations moyennes annuelles risque de cacher la variabilité au cours de l'année elle-même, sachant que cette variabilité peut être extrême. En effet, la figure 2.7 suivante montre clairement la disparité entre les minimums et les maximums des pluies mensuelles. Le rapport est incalculable dans la mesure où presque tous les mois ont observé un

minimum nul. Le rapport entre les précipitations moyennes mensuelles et les valeurs maximales varie de 2 à 4,5. Ces résultats traduisent l'extrême variabilité du climat de la région.

Cette variabilité est nettement visible quand il s'agit de comparer les mois de l'été par à ceux de l'hiver et du printemps. En effet, l'hiver et le printemps reçoivent des quantités comparables par contre l'automne est moins arrosé. Mais le fait marquant est la saison estivale qui est très sèche, elle reçoit moins de 5 mm en moyenne par mos. Ces remarques peuvent être observées et confirmées sur la figure 2.7 donnée ci-après.

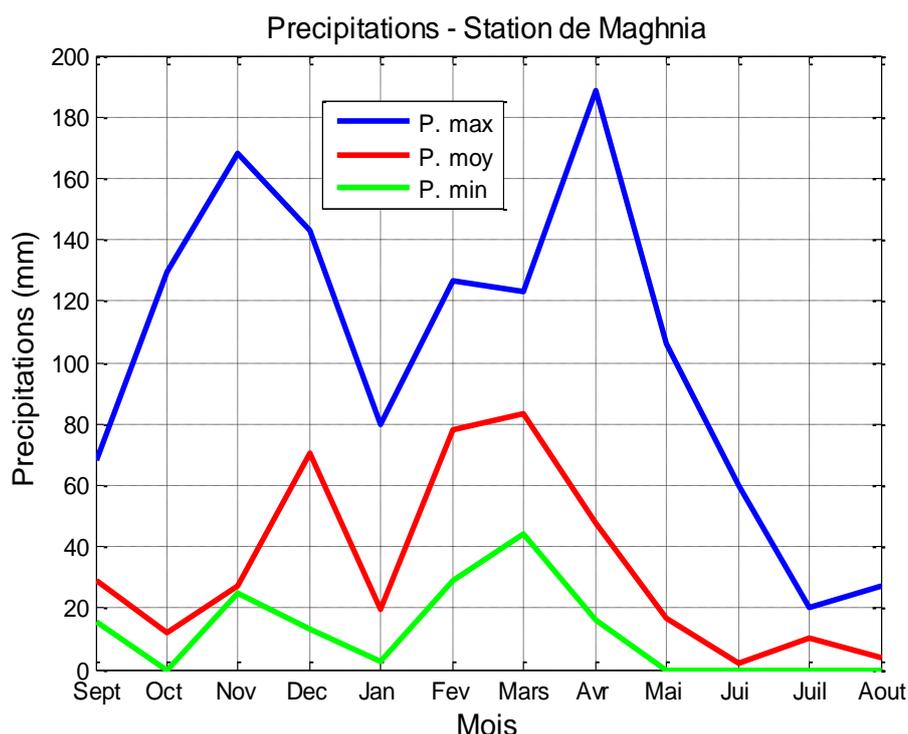


Figure 2.7 : Précipitation minimale, moyenne et maximale des précipitations mensuelles (1973/1974 à 2012/2013).

5.3. Etude des températures

5.3.1. Aperçu sur les données

Les données disponibles concernant les températures proviennent de l'Organisme Nationale de Météorologie (O.N.M.). Elles datent de l'année 1976/1977 jusqu'à l'année 2012/2013. Ces données couvrent pratiquement la même période que celle relative aux données pluviométriques.

Le test sur le rang et le test des signes appliqués à la série des moyennes annuelles indiquent que cette série n'est pas aléatoire et présente une tendance. Cette tendance, très visible sur la

figure 2.8 donnée ci-après, sera détaillée dans le chapitre suivant quand il s'agira d'étudier la variabilité climatique du bassin du barrage Hammam Boughrara.

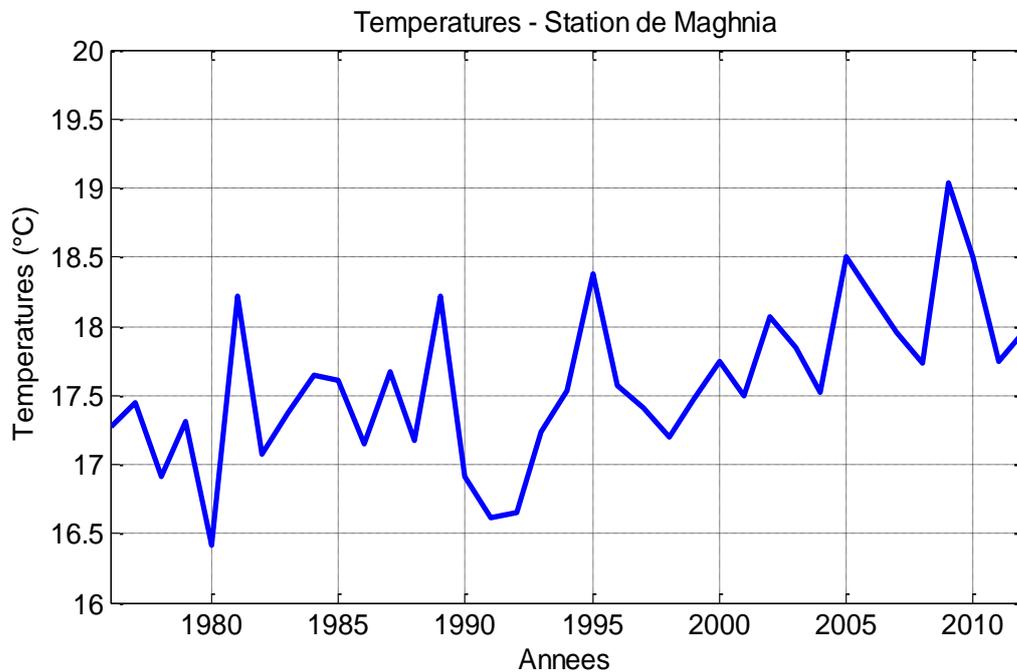


Figure 2.8 : Variations des températures moyennes annuelles de la station de Maghnia (1973/1974 à 2012/2013).

La région de Maghnia, à l'instar du pourtour méditerranéen, se caractérise par des températures chaudes l'été et froides l'hiver. Sur la période d'enregistrement disponible, la température moyenne interannuelle est de 17,6°C. Par rapport à cette valeur, l'année est divisée en deux : une partie dont les températures sont inférieures à cette valeur ; Cette période s'étale de novembre à mars. L'autre période qui s'étale de mai à octobre, les températures sont plus élevées.

Il faut noter que c'est durant les mois de l'été qui sont juin, juillet et août où les températures sont les plus élevées alors que les températures les plus basses sont enregistrées pendant les mois d'hiver qui sont décembre, janvier et février. La figure 2.9 ci-dessous montre cette variation.

Concernant la variation des températures mensuelles minimales et maximales par rapport à la moyenne durant l'année, l'amplitude est très variable. Si en moyenne, elle est circonscrite à $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (Voir la figure 2.10), elle peut atteindre des valeurs relativement élevées comme c'est le

cas du mois décembre où l'écart a dépassé 5°C. Cet écart a été enregistré au début des années 70.

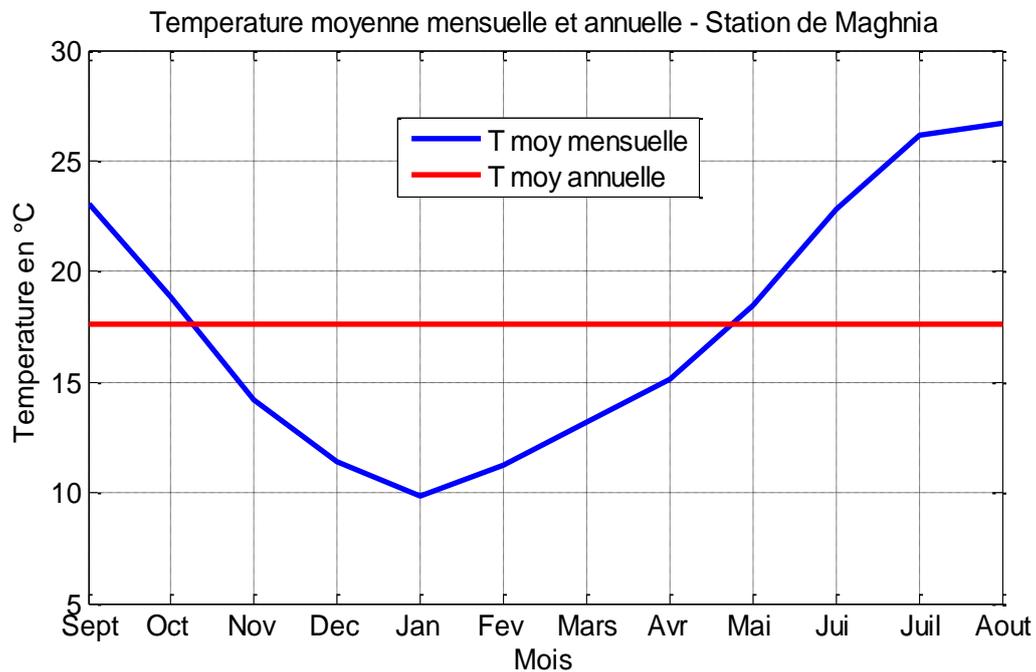


Figure 2.9 : Variations des températures moyennes mensuelles de la station de Maghnia (1973/1974 à 2012/2013).

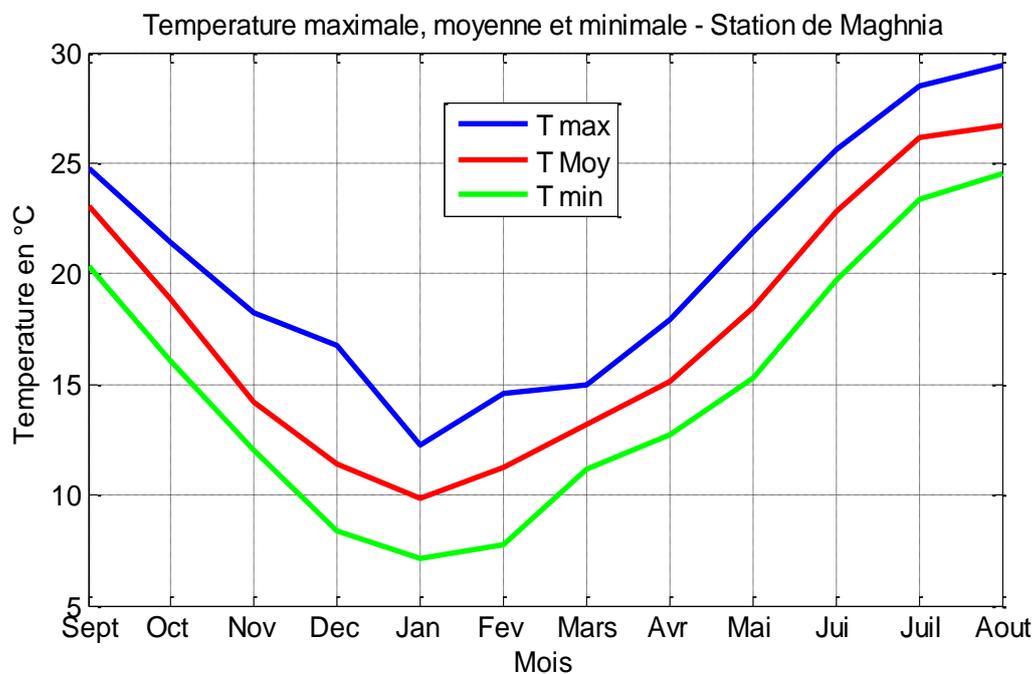


Figure 2.10 : Températures mensuelles minimale, moyenne et maximale de la station de Maghnia (1973/1974 à 2012/2013).

5.3.2. Les indices d'aridité

- **Indice de De Martonne**

Les conditions météorologiques qui règnent sur une région donnée sont gouvernées principalement par le climat. C'est ce qui a poussé certains auteurs à dresser des formules, tableaux ou abaques pour qualifier globalement un climat. Ainsi, De Martonne a proposé un indice calculé par la formule suivante :

$$I_M = \frac{P}{T + 10}$$

Dans la formule ci-dessus, P et T sont respectivement les précipitations moyennes annuelles en mm et la température moyenne annuelle en degré Celsius.

Pour mieux interpréter l'indice d'aridité annuel, De Martonne a donné un abaque où six climats sont définis en fonction des précipitations et des températures moyennes. Ces zones sont indexées par des indices. Ces zones sont :

A : Zone à écoulement abondant ($40 < I_M < 50$).

B : Zone à écoulement exoréique ($30 < I_M < 40$).

C : Zone tempérée, drainage extérieur, irrigation non indispensable ($20 < I_M < 30$).

D : Régime semi-aride, écoulements temporaires, formations herbacées ($10 < I_M < 20$).

E : Régime désertique, écoulements temporaires, drainage intérieur- exoréique ($5 < I_M < 10$).

F : Hyperaridité, aréisme ($I_M < 5$).

L'application de cet indice à la station de Maghnia en prenant en considération les données disponibles a donné :

$$I_M = \frac{286,9}{17,6 + 10} = 10,4$$

Cette valeur classe le climat de la région (Voir la figure 2.11) comme étant du type semi-aride avec des écoulements temporaires et des formations herbacées (Zone D).

Il faut rappeler que les données de la région de Maghnia sont utilisées pour caractériser le climat du bassin du barrage Hammam Boughrara.

Il faut aussi noter que l'indice climatique de De Martonne calculé à l'aide des données disponibles dans ce travail classe le climat de la région à la limite entre les zones D et E, cette dernière étant caractéristique des climats désertiques. Ceci diffère légèrement du positionnement effectué par Baba Hamed [Baba Hamed, 2006] parce que les données

climatiques utilisées ne s'étendent pas sur la même période. Celles utilisées dans ce travail semblent être plus défavorables.

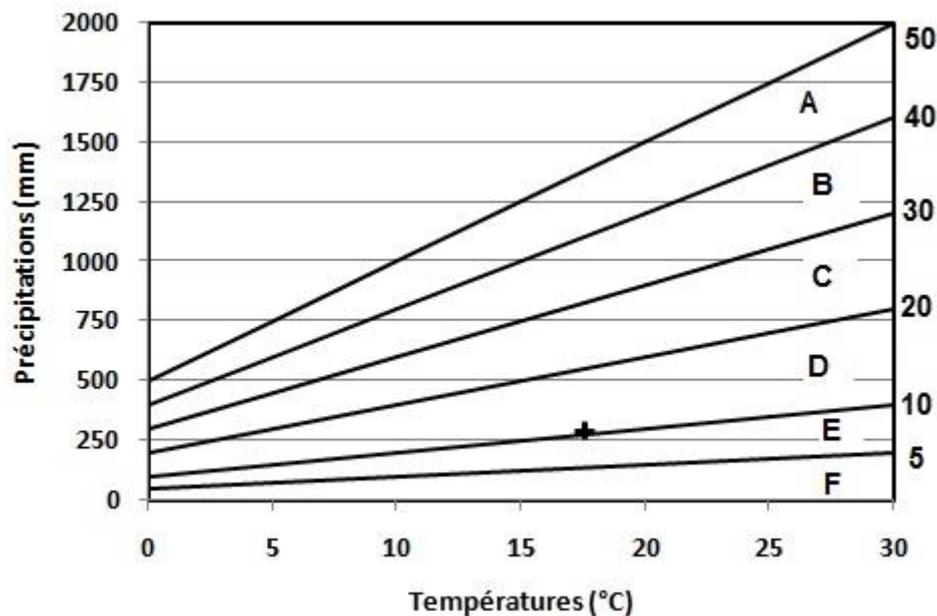


Figure 2.11 : Diagramme et Indice de De Martonne de la station de Maghnia.

Pour examiner l'extrême variabilité du climat de la région durant les différents mois de l'année, les indices mensuels d'aridité de De Martonne ont été calculés et représentés sur la figure 2.12 ci-après.

A titre de rappel, l'indice d'aridité de De Martonne mensuel est défini de la manière suivante :

$$I_M = \frac{12 P}{T + 10}$$

Dans la formule ci-dessus, P et T sont respectivement les précipitations moyennes en mm et la température moyenne en degré Celsius du même mois. Le chiffre 12 est introduit dans cette formule pour calculer les précipitations de l'équivalent d'une année.

La figure 2.12 montre que le climat de la région est extrêmement variable selon les mois de l'année. En effet, seul le mois de février est classé comme à climat tempéré (Zone C). Les mois de novembre, décembre, janvier, mars et avril sont classés à climat semi-aride (Zone D). Il faut noter que ces mois sont dans une position limite entre les zones C et D. Les mois de septembre et de mai sont positionnés dans la zone E, c'est-à-dire caractéristique des climats désertiques. Les mois de l'été que sont juin, juillet et août sont dans la zone F, c'est à dire classées comme à climat hyperaride.

La classification décrite ci-dessus et représentée sur la figure suivante reste une classification globale qui peut cacher des détails. Néanmoins, elle indique clairement que le climat de la région est de type semi-aride qui tend vers l'aridité.

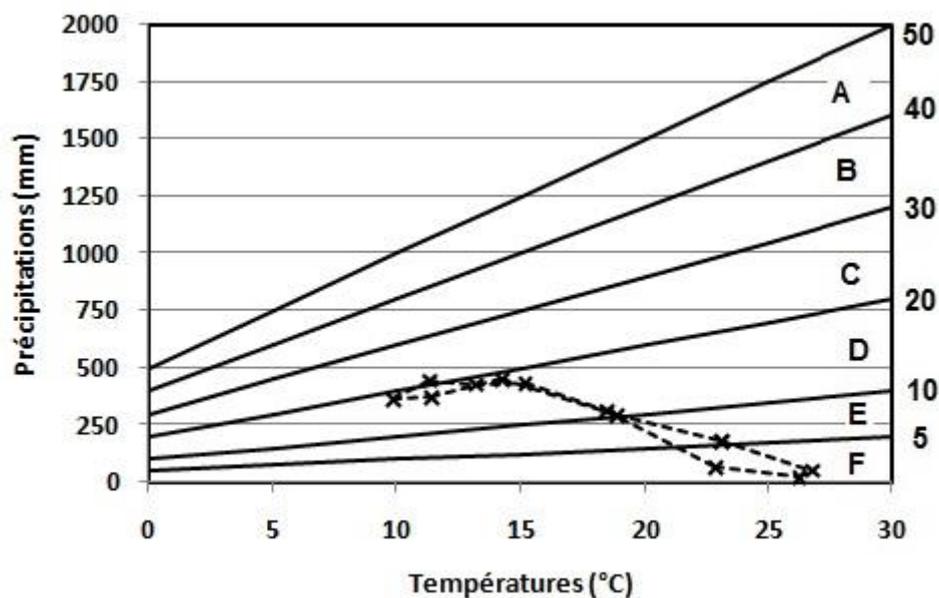


Figure 2.12 : Indice d'aridité mensuel de De Martonne de Maghnia.

- **Le diagramme ombrothermique**

Le diagramme mis au point par Gaussen et Bagnouls permet de visualiser les périodes sèche et humide d'une région ou d'un lieu. Sur ce diagramme, les précipitations moyennes mensuelles en mm sont portées à droite et les températures moyennes mensuelles en °C sont portées à gauche, l'échelle des précipitations est double de celles de températures. Les périodes sont dites sèches quand la courbe des précipitations se trouve en dessous de celle des températures. La figure 2.13 ci-après donne cette représentation pour la station de Maghnia.

Sur cette figure, il ressort que la région est soumise à un climat du type semi-aride caractérisé par l'existence de deux saisons distinctes : une saison sèche qui couvre les mois de mai à octobre et d'une saison humide couvrant les mois de novembre à avril.

De cette courbe, il ressort surtout le fait que les courbes dans la zone excédentaire sont très rapprochées indiquant que l'excédent n'est pas très significatif. Par contre, les courbes sont très éloignées l'une de l'autre dans la partie déficitaire indiquant que le déficit est important. Ces résultats sont globalement retrouvés dans la littérature scientifique qui traite du climat de la région comme mentionné auparavant, les nuances sont dues à la période relative aux données prise en compte dans les différentes études.

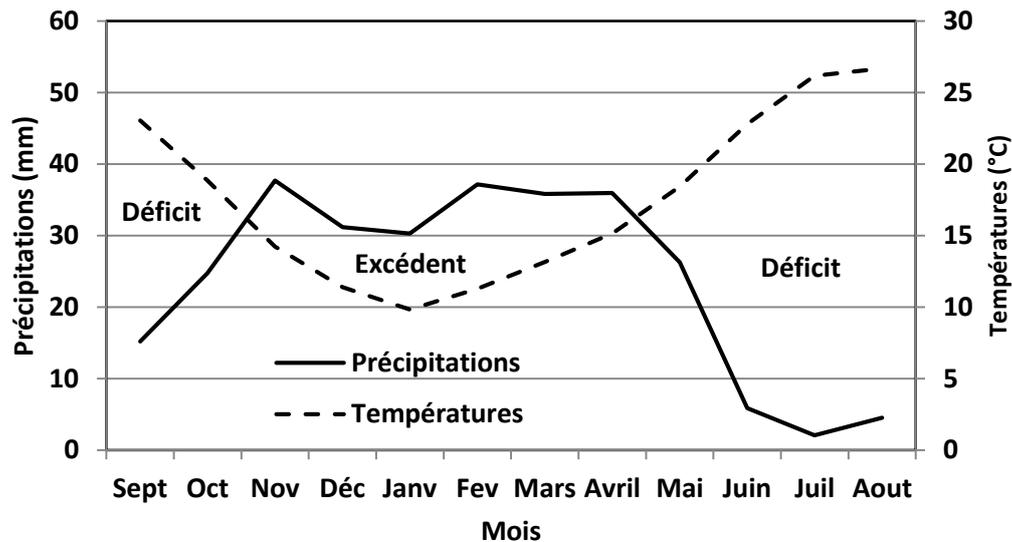


Figure 2.13 : Diagramme ombrothermique de Gausson de la station de Maghnia.

5.4. Evapotranspiration et déficit d'écoulement

Toute l'eau qui tombe dans bassin n'arrive pas aux barrages. En effet, une grande partie de cette eau revient directement à l'atmosphère par le phénomène de l'évapotranspiration. Ce dernier est lié à la température, au couvert végétal et à la topographie. Ce phénomène est généralement très difficile à estimer. On se base en général sur des formules empiriques basées sur l'expérience. Ci-après sont citées les formules les plus rencontrées dans la pratique.

5.4.1. Méthode de Thornthwaite

Thornthwaite a proposé une formule empirique basée sur la corrélation entre l'évapotranspiration des plantes et la température moyenne de l'air. Cette formule s'écrit :

$$E_p = 1,6K \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha$$

Les différents paramètres de cette formule sont :

- E_p : l'évapotranspiration potentielle en mm ;
- K : un coefficient de correction en fonction de la latitude de la région étudiée ;
- T : la température moyenne mensuelle en degré Celsius ;
- I : la somme des indices de chaleur mensuelle.

α est un paramètre qui vaut :

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 1,49$$

I est calculé en sommant les indices mensuels. Ces derniers sont donnés par :

$$i_m = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

5.4.2. Méthode de Turc

La méthode de Turc donne l'évapotranspiration réelle par :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{(300 + 25 \cdot t + 0,05t^3)^2}}}$$

Dans cette formule, P et t sont respectivement les précipitations en mm et la température en degré Celcius.

5.4.3. Méthode de Coutagne

La méthode de Coutagne calcule le déficit d'écoulement D, qui est l'équivalent de l'évapotranspiration réelle, par :

$$D = P - \lambda \cdot P^2$$

où λ est donnée par :

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,145T}$$

Cette formule n'est valable que si :

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

Quand :

$$P > \frac{1}{2\lambda}$$

Le déficit d'écoulement est égal aux précipitations (Toute la pluie repart dans l'atmosphère).

Quand :

$$P < \frac{1}{8\lambda}$$

Le déficit d'écoulement est donné par :

$$D = 0,2 + 0,035T$$

5.4.4. Méthode de Tixeront-Berkaloff

Comparativement aux méthodes précédentes, la méthode Tixeront-Berkaloff donne directement le ruissellement par la formule empirique suivante :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Dans cette relation, P représente les précipitations en mètres, ETP est l'évapotranspiration en mètres aussi. Le ruissellement R est aussi donné en mètres.

5.4.5. Application

Les formules citées ci-dessus sont appliquées au bassin du barrage Hammam Boughrara pour déterminer le taux de ruissellement des eaux de pluies par rapport à ce qui tombe comme précipitations. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants.

- **Méthode de Thornthwaite**

La méthode de Thornthwaite nécessite le calcul de l'évapotranspiration de chaque mois et la somme donne l'évapotranspiration annuelle. Le calcul est détaillé dans le tableau 2.4 suivant.

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	15,20	24,76	37,72	31,20	30,30	37,16	35,82	35,98	26,27	5,87	2,10	4,56
t (°C)	23,0	18,9	14,2	11,4	9,8	11,3	13,2	15,2	18,4	22,8	26,2	26,7
i	10,1	7,5	4,9	3,5	2,8	3,4	4,3	5,4	7,2	10,0	12,3	12,6
Alfa	1,85											
I	83,87											
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16
ETP	103,54	71,43	42,51	28,19	21,49	27,68	36,75	47,71	68,53	101,57	131,00	135,65
ETR	30,60	15,67	6,47	3,49	2,40	3,40	6,25	9,72	18,39	32,83	48,54	48,19

Tableau 2.4 : Evapotranspiration selon la méthode de Thornthwaite.

Cette méthode donne une évapotranspiration potentielle annuelle de **816,1 mm** et une évapotranspiration réelle de **225,9 mm**, c'est-à-dire que les ruissellements de surface et les infiltrations représentent une valeur de **27,0 mm** soit **21%**.

- **Méthode de Turc**

L'évapotranspiration évaluée par la méthode de Turc est résumée sur le tableau suivant.

P (mm)	t (°C)	L	ETR (mm)	ETR (%)
286,9	17,6	1012,6	289,8	100

Tableau 2.5 : Evapotranspiration selon la méthode de Turc.

La méthode de Turc évalue l'évapotranspiration à 100 %, c'est-à-dire que toute la pluie qui tombe retourne à l'atmosphère et qu'il n'y aurait ni ruissellement ni infiltration.

- **Méthode de Coutagne**

Les paramètres permettant d'évaluer l'évapotranspiration par la méthode de Coutagne sont résumés sur le tableau suivant :

P (m)	T (°C)	λ	$1/2 \lambda$	$1/8 \lambda$	$D=0,2+0,035 T$ (m)
0,2869	17,6	0,298	1,632	0,408	0,816

Tableau 2.6 : Déficit d'écoulement selon la méthode de Coutagne.

Pour cette méthode, il faut noter que ce n'est pas la formule principale qui a été appliquée car la valeur des précipitations sort du domaine d'application de cette dernière. En même temps, la formule secondaire fournit une valeur du déficit d'écoulement (évapotranspiration réelle) qui dépasse les précipitations. En conséquence, cette méthode n'est pas applicable pour les données de la station de Maghnia.

- **Méthode de Tixeront-Berkaloff**

La méthode de Tixeront-Berkaloff utilise l'évapotranspiration potentielle évaluée par la méthode de Thornthwaite. Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau 2.7 suivant.

P (mm)	T (°C)	ETP	R (mm)
286,9	17,6	816,1	11,82

Tableau 2.7 : Déficit d'écoulement selon la méthode de Tixeront-Berkaloff.

La méthode de Tixeront-Berkaloff donne un ruissellement de 11,82 mm, soit 4% des précipitations. Cette proportion peut paraître très faible. Une discussion sera effectuée à ce propos dans la partie relative à l'étude de la régularisation.

6. Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la description du climat du bassin versant du barrage Hammam Boughrara. Faute de données concernant les températures de la station du barrage, c'est les données de la ville de Maghnia qui ont servi pour décrire ce climat. Ceci a été jugé possible parce que la ville de Maghnia est à une distance vol d'oiseaux de moins de 10 km du barrage même si les altitudes sont légèrement différentes (Maghnia est à 310 m et Hammam Boughrara est à 253 m).

Les méthodes utilisées pour décrire ce climat classe ce dernier parmi les climats semi-arides. Ce climat est caractérisé par l'existence de deux saisons nettement distinctes : hiver froid et humide et été chaud et sec. L'étude du climat de la région en fonction des données mensuelles montre que ce climat est à cheval entre semi-aride et aride, seul le mois de février est classé dans la gamme des climats tempérés.

Enfin, bien que ce travail concerne en particulier la variabilité climatique, des exemples de méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle, de l'évapotranspiration réelle et du déficit d'écoulement ont été listées puis appliquées aux données de la station de Maghnia. Ceci est effectué dans l'objectif principal de montrer qu'il est très difficile d'estimer la partie des précipitations qui ruisselle par rapport à celle qui revient à l'atmosphère par le phénomène de l'évapotranspiration sans des mesures réelles et pratiques surtout sous des climats arides et semi-arides comme ceux qui règnent dans la région du barrage.

Chapitre 3

Variabilité climatique et sécheresse

1. Introduction

L'Algérie a connu à partir de la moitié des années 70 une grave crise de disponibilité d'eau. La population et l'agriculture ont été sévèrement touchées. L'eau potable devenait de plus en plus rare dans les robinets et l'irrigation a été complètement bannie des pratiques agricoles. Ce manque d'eau a été imputé à une sécheresse qui s'est installée dans le pays et particulièrement sa région ouest [Meddi et Hubert, 2003 ; Adjim, 2004 ; Meddi H et Meddi M., 2009 ; Ghenim et Megnounif, 2013].

Bien que la politique du pays en matière de ressource en eau se soit adaptée à cette rareté en adoptant la technique du dessalement de l'eau de mer, les précipitations restent le premier gisement duquel est mobilisée cette ressource. C'est pourquoi ce chapitre sera réservé aux méthodes et techniques de détection et de caractérisation des sécheresses. Il sera ainsi question des techniques utilisant uniquement des indices simples à calculer, les techniques basées sur les tests statistiques pour déceler les modifications dans le régime des précipitations. En fin de chapitre, les questions de persistance et de tendances seront abordées. Une comparaison conclura ce chapitre.

Concernant les données, quatre stations pluviométriques seront utilisées. Ces stations ont été choisies car elles disposent de séries suffisamment longues sensées être représentatives de la région. La station de Maghnia est très proche du site du barrage, ses enregistrements s'étalent sur 40 années : de 1973/1974 à 2012/2013. La station Béni Bahdel est située à la limite du bassin, ses enregistrements s'étalent sur 71 ans. La station de Zenata se situe à l'Est du bassin à moins de 20 km à vol d'oiseaux du barrage. Cette station à l'avantage d'avoir une série de données des pluies très longue (90 ans ; 1922/1923-2012/2013) et de disposer comme le cas de la station de Maghnia, des relevés des températures. Les enregistrements des températures s'étalent de l'année 1976/1977 à l'année 2012/2013 pour les deux stations Maghnia et Zenata.

Le tableau ci-dessous liste les noms des stations retenues ainsi que les périodes d'enregistrement de la pluviométrie.

Tableau 3.1 : Liste des stations pluviométriques utilisées.

N°	Nom de la station	Code	X	Y	Z	Période des observations
1	Maghnia	160 302	90,65	174,65	395	De 1973/1974 à 2012/2013
4	Béni Bahdel	160 403	114,98	164,6	666	De 1939/1940 à 2010/2014
7	Hammam Boughrara	160 501	103,7	185,8	270	De 1969/1970 à 2010/2011
8	Zenata	160 502	120,15	194,6	247	De 1922/1923 à 2012/2013

2. Définition de la sécheresse

En général, le terme « sécheresse » désigne un problème de déficit en eau. Ce déficit d'eau est apprécié sous différents aspects. Ainsi, on parle de :

- La sécheresse météorologique : La sécheresse météorologique est définie comme étant une diminution des précipitations par rapport à une valeur « seuil », généralement la moyenne par rapport à une durée dans le temps.
- La sécheresse hydrologique : La sécheresse hydrologique désigne généralement la diminution des écoulements de surface et la diminution du niveau des nappes.
- La sécheresse agronomique : La notion de sécheresse agronomique ou agricole est utilisée pour décrire un état de déficit d'eau du sol ne permettant pas aux cultures de se développer correctement.

Ces diverses définitions indiquent clairement que le phénomène de sécheresse est directement lié à la diminution des précipitations dans la mesure où les sécheresses hydrologique et agricole sont très souvent des conséquences de la sécheresse météorologique. En effet, les écoulements de surface, la recharge des nappes ou l'eau des sols nécessaires à la croissance des cultures viennent en premier lieu de la pluie. Ensuite, il y'a l'effet dû de la durée. Si cette sécheresse dure quelques mois ou quelques années consécutifs, les conséquences ne seront plus les mêmes. D'ailleurs, c'est en général sur la base de la diminution des précipitations en fonction de la durée que la plupart des méthodes de caractérisation et d'évaluation de la sévérité des sécheresses sont basées. Ces méthodes utilisent les pluies journalières, mensuelles ou annuelles.

La sécheresse frappe en général des régions entières. C'est pourquoi, les stations qui seront utilisées encadrent plus ou moins le bassin du barrage. La caractérisation va donc concerner le site du barrage et le bassin de celui-ci. Une moyenne des précipitations sera effectuée dans ce sens utilisant la méthode des éléments finis. Ce point permettra d'examiner le cas de la régularisation.

3. Méthodes de caractérisation des sécheresses

3.1. Méthodes basées sur les indices

Les indices sont des paramètres calculés en utilisant des données hydrométéorologiques comme la pluie ou les débits. Ces indices servent à caractériser la sécheresse à un moment donné. Ils utilisent pour la plupart d'entre eux les données annuelles. Des indices utilisant le pas de temps mensuels existent. Un exemple sera donné dans ce chapitre.

3.1.1. Ecart standardisé par rapport à la moyenne

Le moyen le plus simple pour caractériser la quantité de pluie qui est tombée sur une région est de la comparer à la moyenne. Bien sûr, il faut que cette moyenne soit représentative du comportement pluviométrique de la région. L'indice qui est défini est « l'indice de pluviosité ». Ce dernier s'écrit :

$$I_p = \frac{P_i}{P_m}$$

P_i et P_m sont respectivement la pluie de l'année (i) et la moyenne interannuelle des pluies.

Cet indice peut s'appliquer aux mois ou aux années. Mais ne permettant pas une vision globale, cet indice est utilisé presque exclusivement pour caractériser les pluies annuelles.

Graphiquement, cet indice n'est pas très expressif, il lui est préféré généralement « l'écart standardisé à la moyenne ». Ce dernier s'écrit :

$$E_m = \frac{P_i - P_m}{P_m} = \frac{P_i}{P_m} - 1$$

Bien que cet indice est presque identique au précédent, il est plus expressif graphiquement en ce qui concerne l'évolution des précipitations dans le temps.

A titre de comparaison, les quatre figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 représentent l'écart standardisé à la moyenne des stations de Maghnia, Hammam Bouhrara, Béni Bahdel et Zenata. Pour une

meilleure lisibilité, les quatre graphiques ont été calées sur la même période et à la même échelle verticale.

Sur ces figures, deux phases distinctes se dégagent : une première phase excédentaire et une seconde phase déficitaire. La période déficitaire semble démarrer en 1981/1982 pour la station de Maghnia, en 1977/1978 pour la station Hammam Boughrara, en 1975/1976 pour la station Béni Bahdel et en 1976/1977 pour la station de Zenata. Il faut noter que la station de Maghnia se trouve à l'Ouest du barrage, Béni Bahdel se trouve au Sud du barrage mais à une altitude plus élevée. La station Zenata est plutôt au Nord du barrage dans des plaines. Pour les quatre stations, la sécheresse est plus nette en ce qui concerne la pluviométrie de Zenata. Ceci peut être expliqué par la longueur de la série de mesure. En effet, la pluie étant plus favorable dans le passé, il se pourrait que les pluies proches de la moyenne des dernières années soient classées comme déficitaires. Pour les trois autres stations, quelques années émergent comme à humidité modérée avec un net retour pour l'année 2008/2009.

La somme successive des écarts standardisé par rapport à la moyenne permet de déceler les tendances dans les séries. C'est ce qui est représenté sur la figure 3.5. Les courbes montrent clairement que les quatre séries admettent un cycle de baisse de la pluviométrie qui démarre à peu près à la même période. Les stations de Maghnia et de Hammam Boughrara voient se déclencher un léger cycle de remontée en fin de la série. Pour pouvoir juger de ce retour de la pluie, il faut disposer de données postérieures à ces années là.

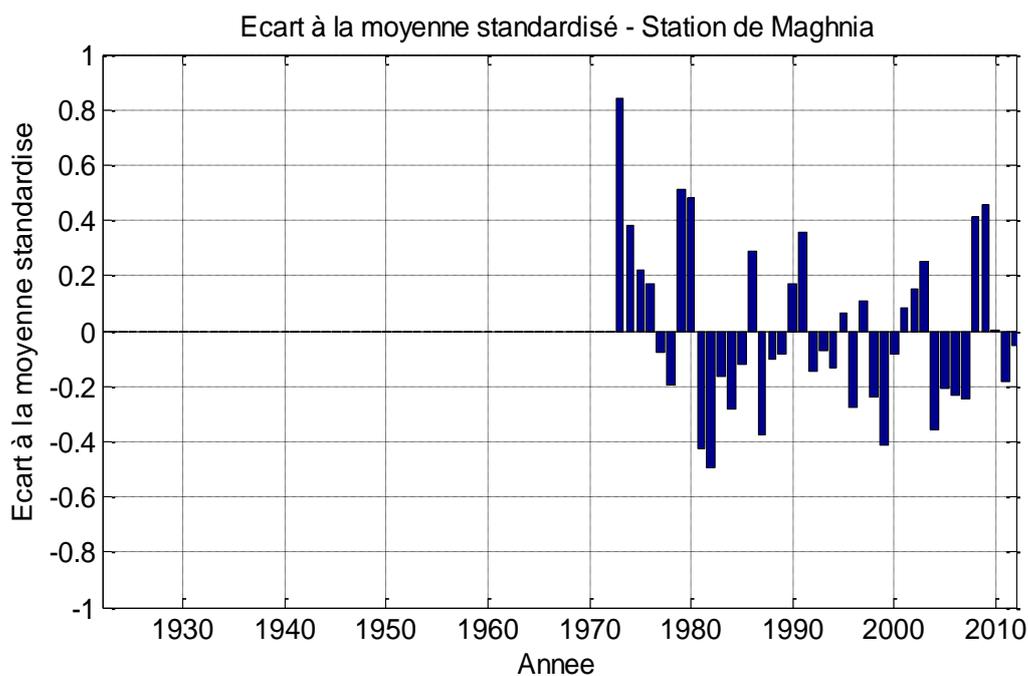


Figure 3.1 : Ecart standardisé à la moyenne de la station de Maghnia.

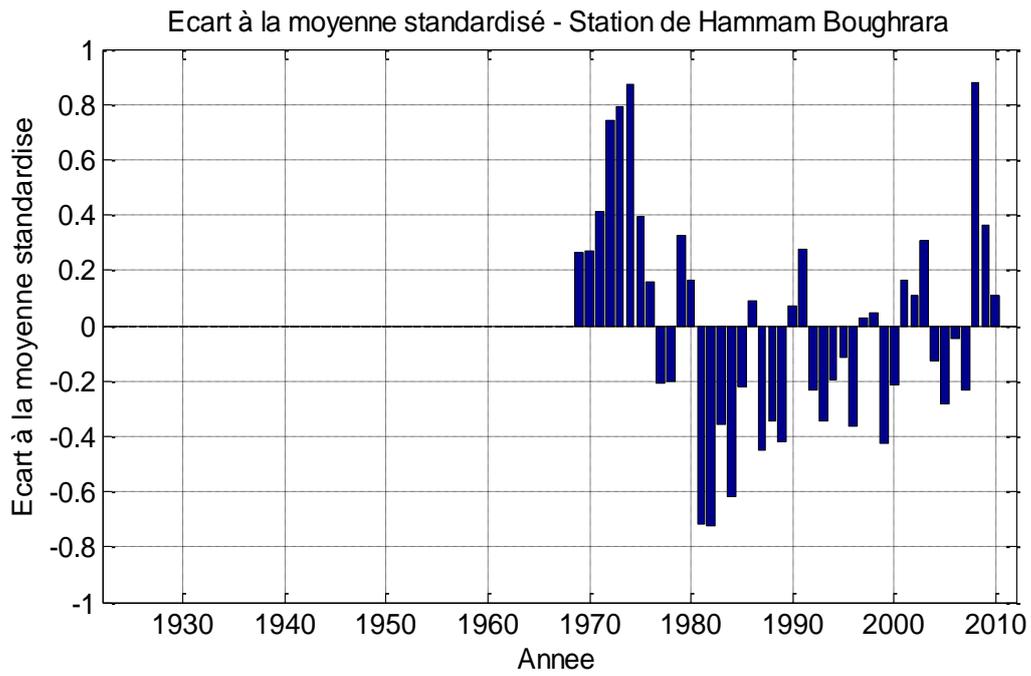


Figure 3.2 : Ecart standardisé à la moyenne de la station Hammam Bouhrara.

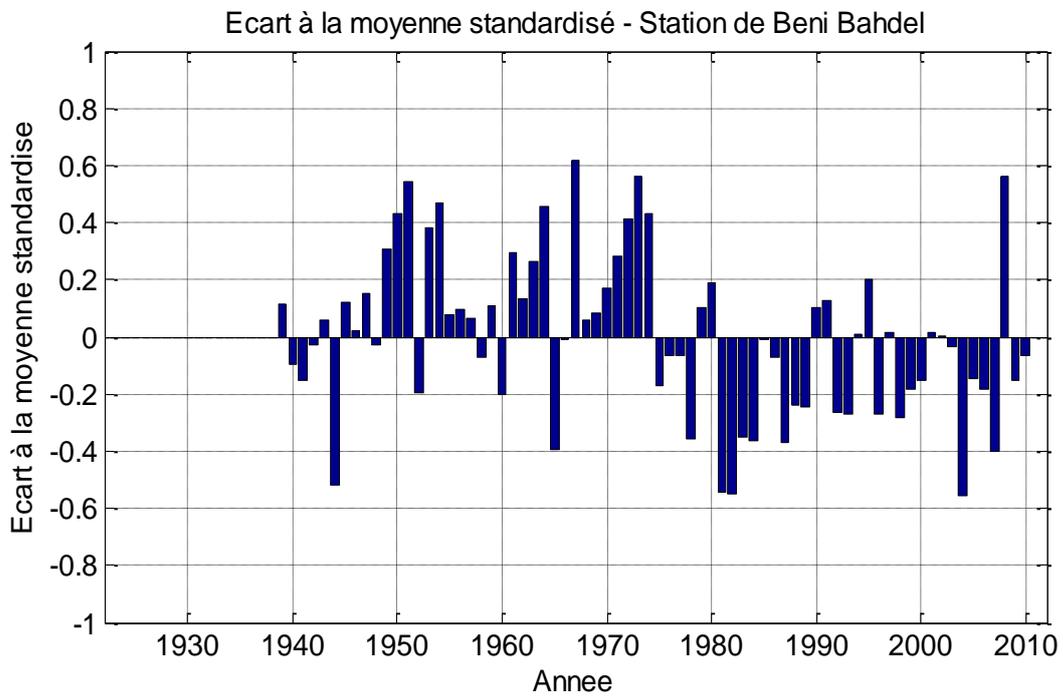


Figure 3.3 : Ecart standardisé à la moyenne de la station Béni Bahdel.

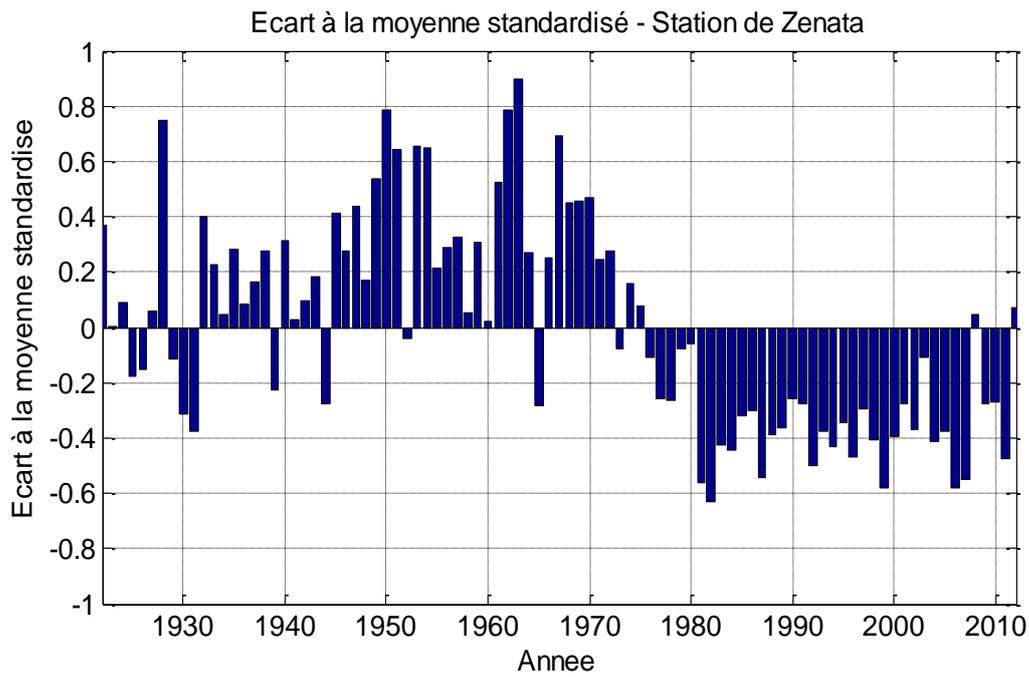


Figure 3.4 : Ecart standardisé à la moyenne de la station de Zenata.

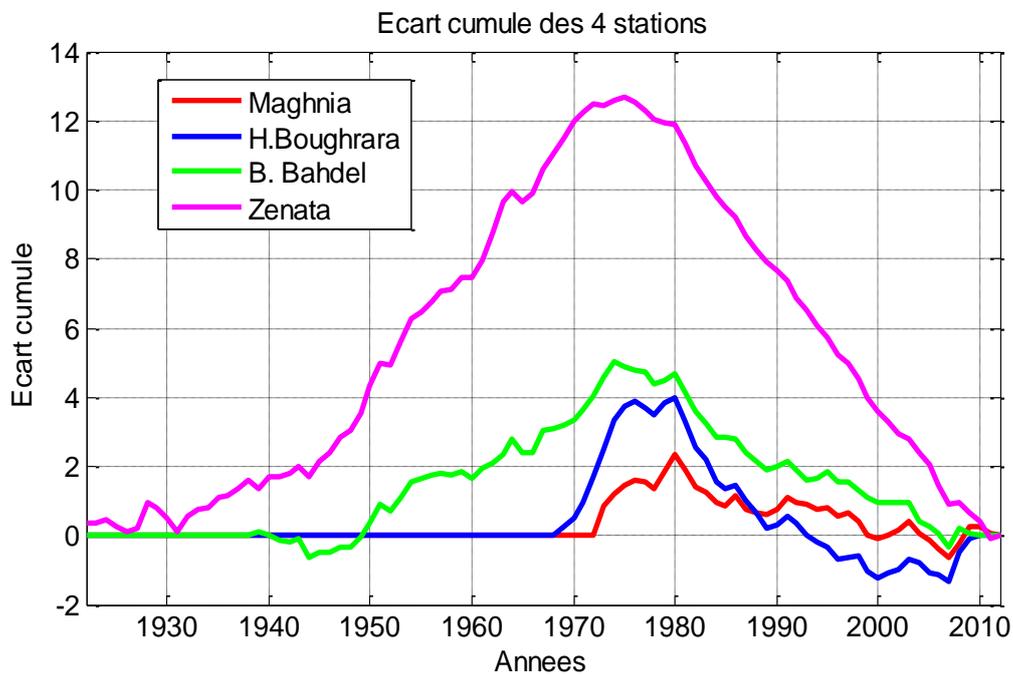


Figure 3.5 : Cumul des écarts standardisés à la moyenne des quatre stations.

3.1.2. Indice des précipitations normalisé (Standard Precipitations Index –SPI)

L'indice des précipitations normalisé (SPI) a été proposé par McKee et ses collaborateurs de l'université d'état du Colorado aux Etats-Unis en 1992 et recommandé en 2009 par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM) pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique [OMM, 2012]. Le SPI se calcule pour 1 mois, 3 mois, 6 mois, 12 mois ou 24 mois. Il présuppose que les pluies suivent la loi normale. Cette dernière est écrite sous la forme centrée réduite et l'indice se calcule de la manière suivante :

$$SPI = \frac{P_i - P_m}{\sigma}$$

La variable σ dans la formule précédente est l'écart type de la série des précipitations.

En fonction des valeurs numériques du SPI, McKee a proposé la classification suivante :

Tableau 3.2 : Valeurs de SPI et état d'humidité [OMM, 2012].

SPI	Qualification
2 et plus	Extrêmement humide
De 1,5 à 1,99	Très humide
De 1,0 à 1,49	Modérément humide
De - 0,99 à 0,99	Proche de la normale
De - 1,49 à - 1,0	Modérément sec
De -1,99 à - 1,5	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

En fait, ce tableau est une répartition selon les probabilités d'occurrence. Un simple calcul donne les probabilités d'occurrence des années sèches du tableau suivant.

Tableau 3.3 : Probabilité d'occurrence des années sèches [OMM, 2012].

SPI	Probabilité d'occurrence
de - 0,99 à 0,0	Une fois tous les 3 ans
de - 1,49 à - 1,0	Une fois tous les 10 ans
de -1,99 à - 1,5	Une fois tous les 20 ans
-2 et moins	Une fois tous les 50 ans

Pour appliquer l'indice SPI aux différentes séries, il faut que les mesures de celles-ci s'ajustent à la loi normale. Or, les tests de Khi-2 et de Kolmogorov-Smirnov appliqués aux données des quatre séries indiquent que les données des stations de Maghnia, de Hammam Boughrara et de Béni Bahdel s'ajustent à la distribution normale alors que les données de la station de Zenata ne s'y ajustent pas. La représentation de l'ajustement graphique des données de la station de Maghnia a été déjà donnée sur la figure 2.6 du chapitre 2, celles relatives aux données des stations de Hammam Boughrara, de Beni Bahdel et de Zenata sont données sur les figures 3.6, 3.7 et 3.8. Ces figures confirment les résultats des tests, c'est-à-dire que les données des stations de Maghnia, de Hammam Boughrara et de Beni Bahdel s'ajustent bien à la loi normale alors les données de la station de Zenata s'en écarte.

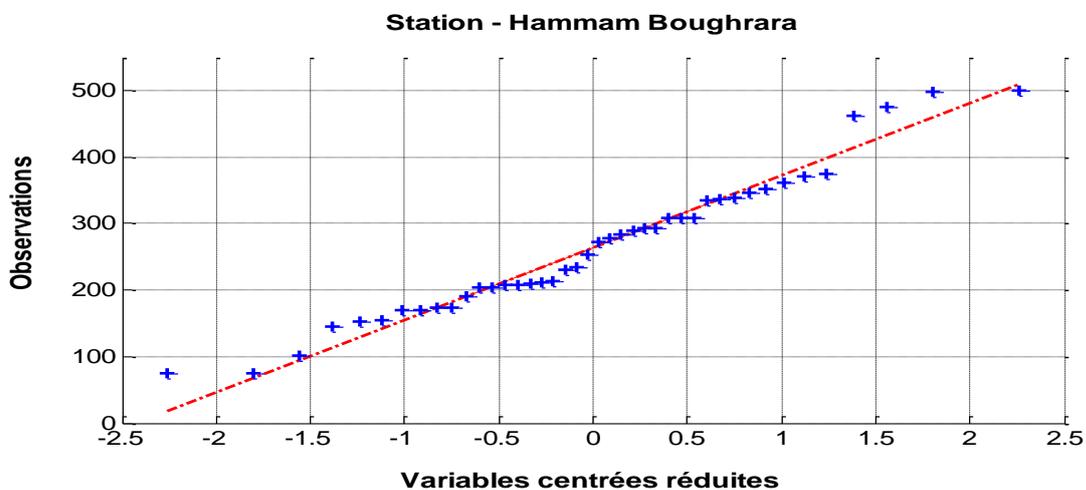


Figure 3.6 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Hammam Boughrara

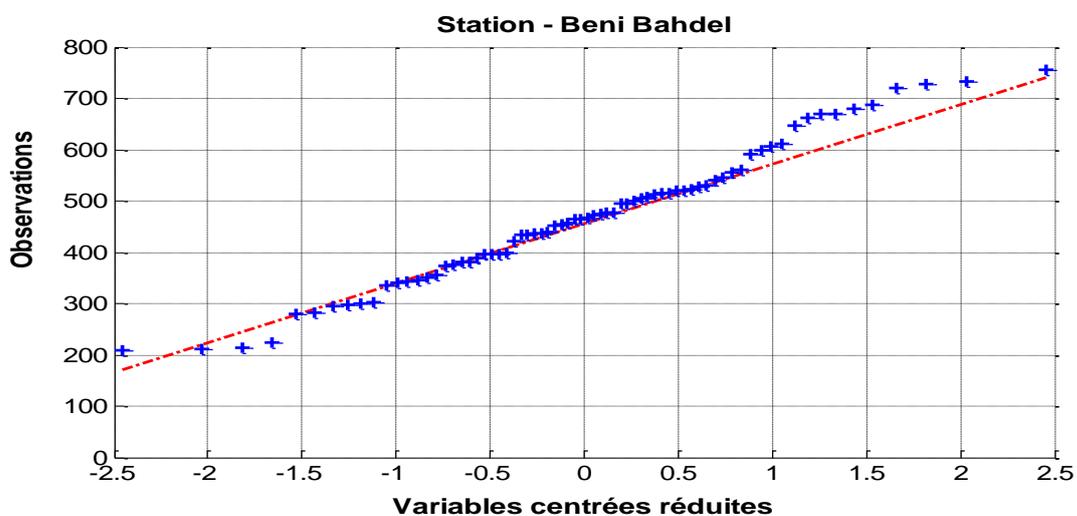


Figure 3.7 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Beni Bahdel

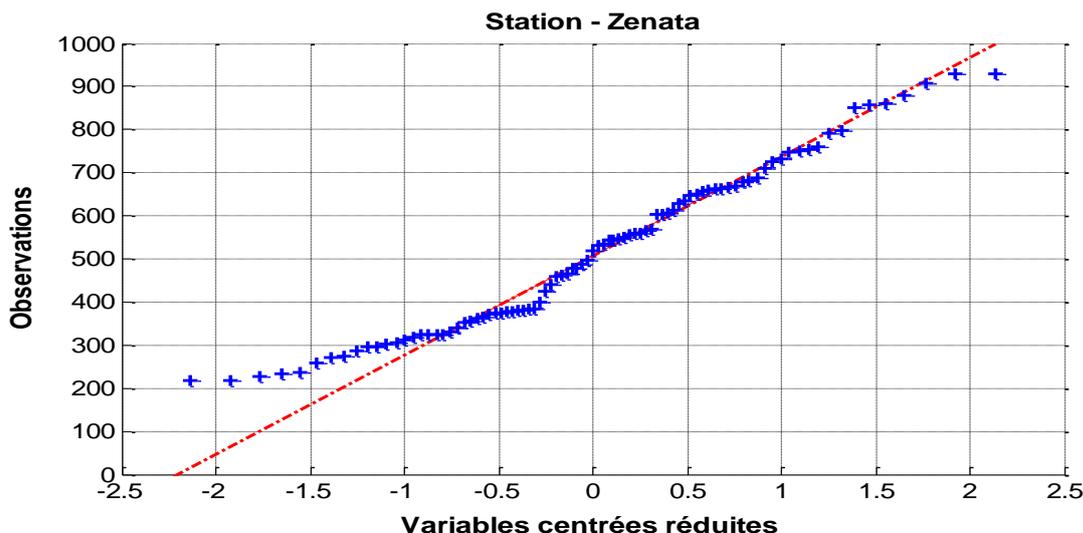


Figure 3.8 : Ajustement à la loi normale des précipitations de la station de Zenata

Finalement, l'indice SPI ne sera appliqué qu'aux trois (03) stations ayant vérifié le critère d'ajustement à la loi normale. Une représentation graphique du SPI de ces trois (03) stations est donnée sur les figures 3.9, 3.10 et 3.11.

Ces figures conduisent aux mêmes conclusions que celles relatives à l'écart à la moyenne standardisée, car ce n'est que l'échelle verticale qui a changé. Par contre, le fait que la méthode du SPI soit basée sur une modélisation statistique, il est intéressant de remarquer que :

- Les figures représentant les SPI des stations de Maghnia et de Hammam Bouhrara indiquent que les années sèches sont plus nombreuses que les années humides lors des dernières années. La période de déficit pluviométrique est entrecoupée par quelques années humides. Il y'a lieu de noter le pic de l'année 2008/2009. Pour la station de Maghnia, 25 années sont classées sèches sur une série de 40 ans. Pour la station de Hammam Bouhrara, 21 années sont classées sèches sur une série longue de 38 ans.
- Pour la station Béni Bahdel, la sécheresse semble débiter en 1975/1976 et sur les 36 années classées comme modérément sèches, sèches ou très sèches, 25 années appartiennent à la période post-1975/1976. Durant la période sèche, il y'a quelques années modérément humides mais il y'a surtout l'année 2008/2009 où la pluie a été très forte, elle a atteint la classe de très humide.

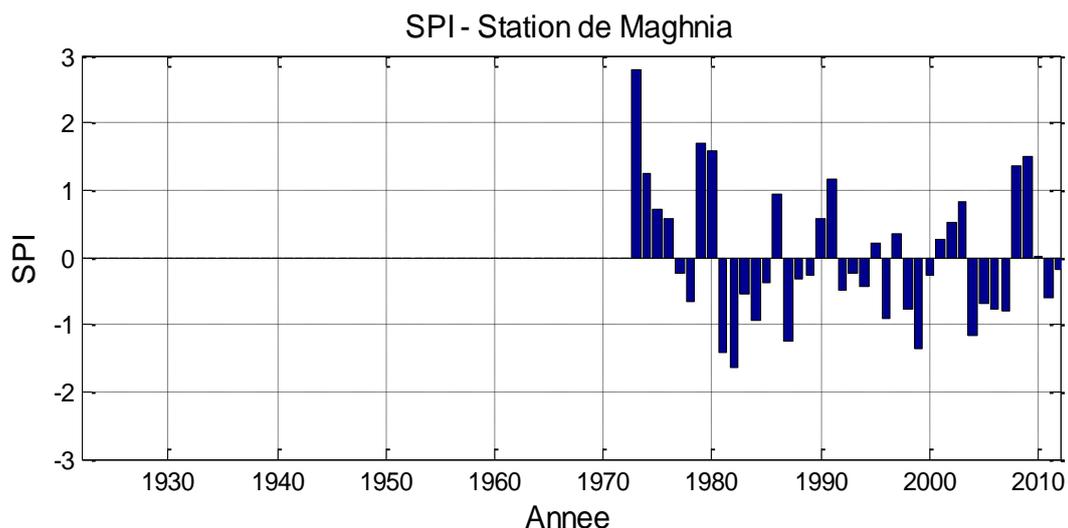


Figure 3.9 : Valeurs du SPI de la station de Maghnia.

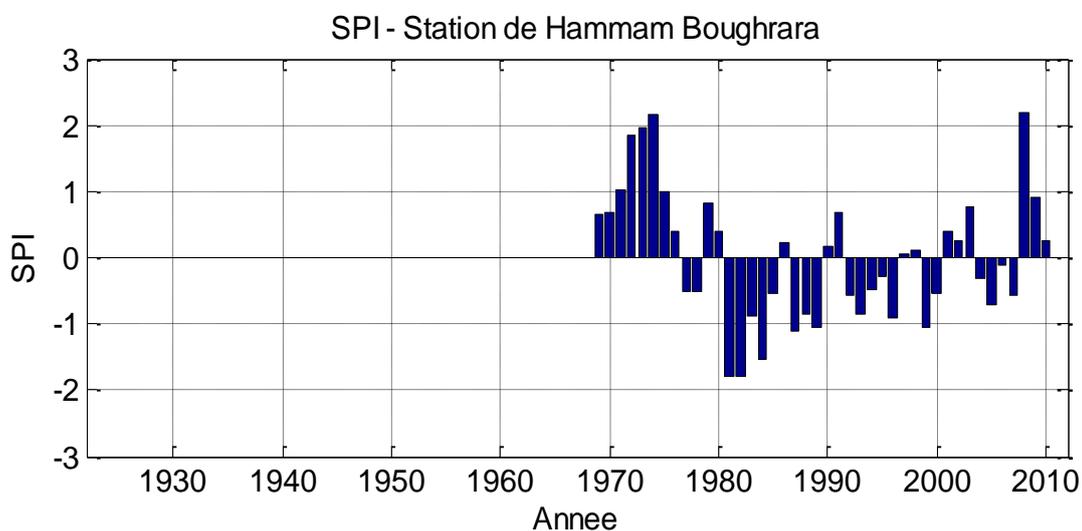


Figure 3.10 : Valeurs du SPI de la station de Hammam Bouhrara.

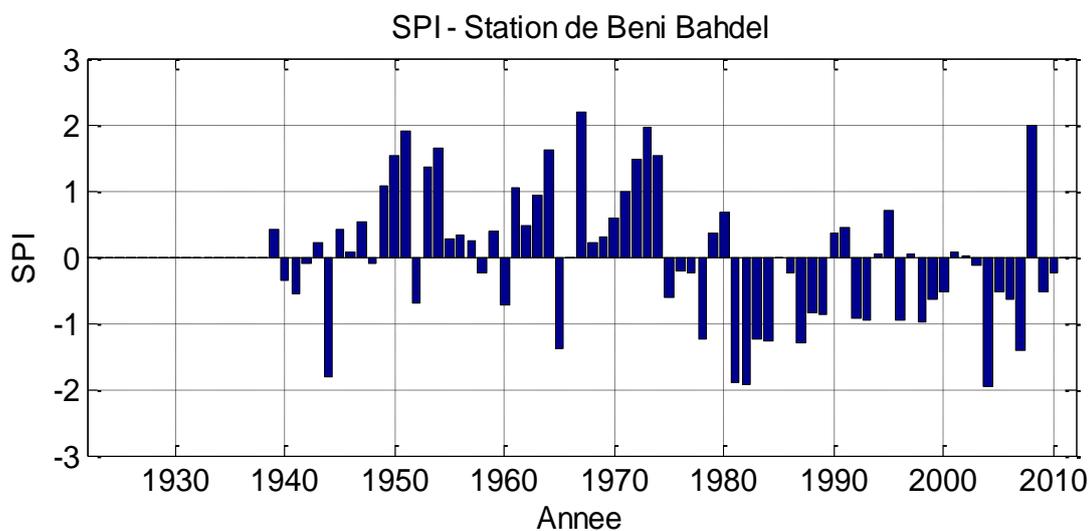


Figure 3.11 : Valeurs du SPI de la station de Béni Bahdel.

3.1.3. Indice de Pita

Estimant que c'est la sécheresse mensuelle qui déséquilibre le bilan hydrique annuel des précipitations, Pita [Pita, 2000] a proposé un indice qui tient compte de ce point en rendant compte du cumul du déficit mensuel des précipitations. Pour calculer cet indice, la première opération consiste à calculer l'anomalie (A_{P_i}) du mois (i) défini par :

$$A_{P_i} = P_i - P_{MED}$$

P_i et P_{MED} sont respectivement les pluies du mois (i) et la médiane de la série correspondant au même mois (i).

L'anomalie cumulée du mois i (APA_i) est déterminée en sommant toutes les anomalies mensuelles négatives jusqu'à arriver à une anomalie cumulée positive. Ce calcul est répété jusqu'à la fin de la série de pluie traitée.

Enfin, l'indice de Pita ($ISSP_i$) ainsi défini est déterminé en standardisant les anomalies cumulées par la formule :

$$ISSP_i = \frac{APA_i - APA_m}{\sigma_{APA}}$$

APA_m et σ_{APA} sont respectivement la moyenne et l'écart type des anomalies cumulées de tous les mois de la série.

L'application de cet indice aux quatre stations retenues dans cette étude donne les résultats représentés sur les figures suivantes.

- Station de Maghnia

L'indice de Pita appliqué à la station de Maghnia met en lumière le fait que les déficits en pluies sont plus nombreux que les excès (Figure 3.12). Le plus souvent, c'est les périodes déficitaires qui sont entrecoupées par quelques mois excédentaires. Certaines périodes de déficit sont continues comme celle qui s'étend de l'année 1979/1980 jusqu'à l'année 1985/1986. Bien qu'il semble que la sécheresse s'est installée dans cette zone, la figure laisse penser que celle-ci est en train de s'atténuer.

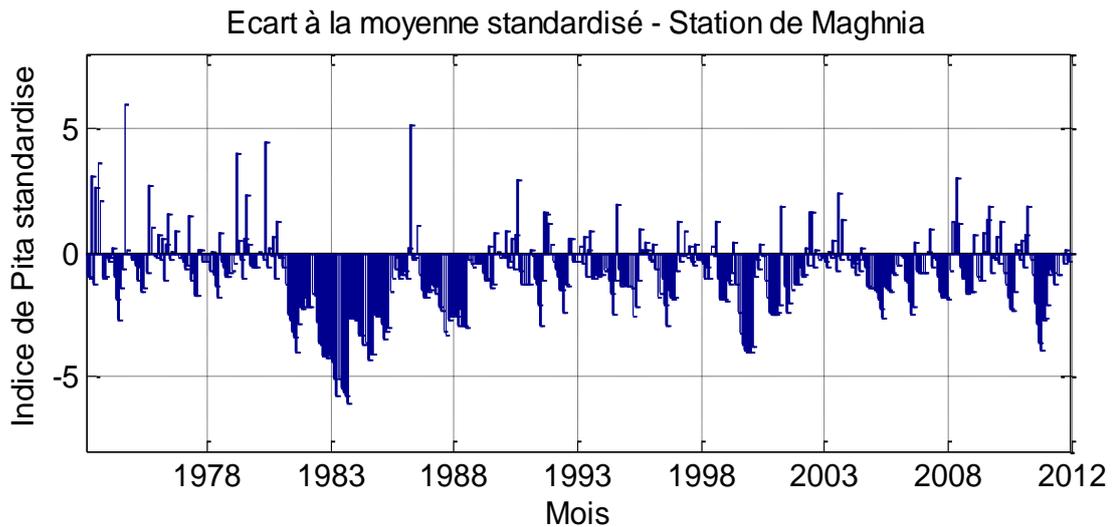


Figure 3.12 : Indice de Pita de la station de Maghnia.

- Station de Hammam Bouhrara

A la station de Hammam Bouhrara et comme la station de Maghnia, le déficit est plus important que les excès (Figure 3.13). En plus, l'indice de Pita semble indiquer pour cette station que le déficit est plus important dans la mesure où la sécheresse semble plus longue et plus grave. En effet, de Aout 1980 à décembre 1994, tout les mois sont déficitaires, c'est-à-dire 14 ans plus quelques mois. L'indice de Pita atteint la valeur (-13,4) indiquant une sécheresse extrême et un déficit pluviométrique grave. Cette valeur extrême du déficit correspond à l'année 1985/1986.

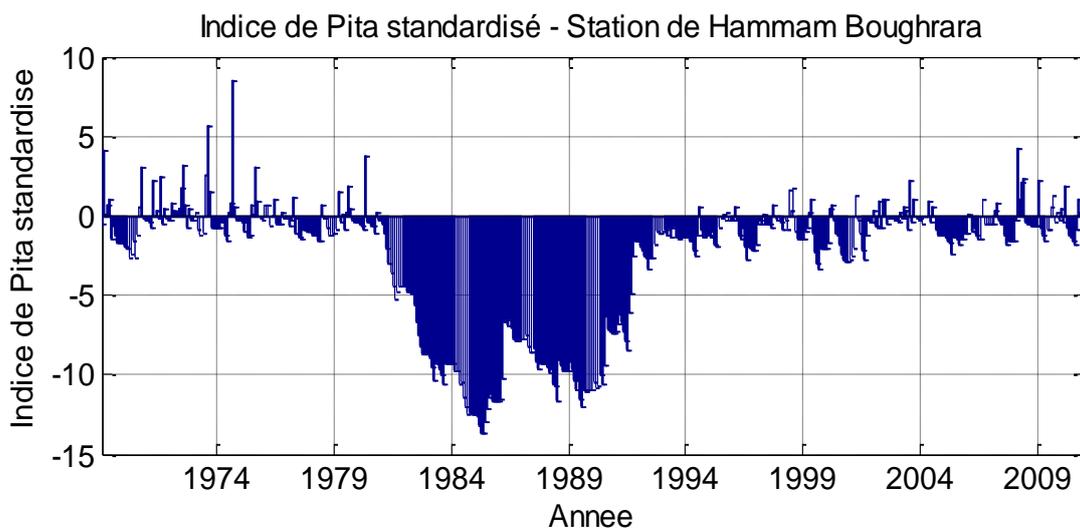


Figure 3.13 : Indice de Pita de la station Hammam Bouhrara.

- Station de Béni Bahdel

La même remarque s'applique à la station de Béni Bahdel. Même pour cette station qui a une série de mesures plus longue, la courbe (Figure 3.14) est située plus en bas qu'en haut indiquant plus de déficit que d'excès.

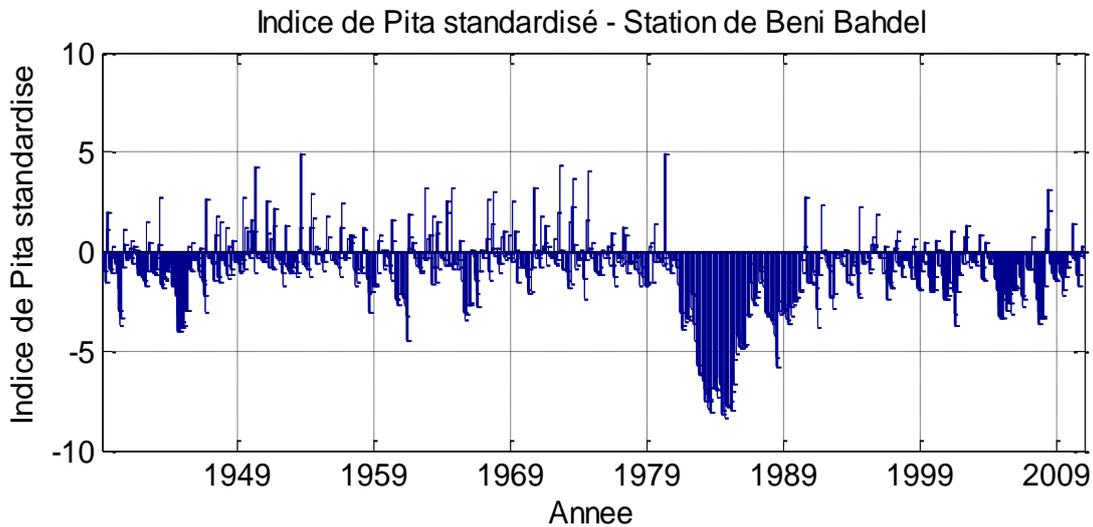


Figure 3.14 : Indice de Pita de la station Béni Bahdel.

Contrairement aux autres stations citées auparavant, la sécheresse qui paraît moins grave, semble ne pas s'atténuer. La période allant de Janvier 1981 jusqu'à janvier 1991 présente des mois déficitaires en continu donnant une période sèche de 10 ans.

- Station de Zenata

L'application de l'indice de Pita à la station de Zenata donne un résultat très particulier. En effet, malgré l'alternance de période sèche et de période humide, c'est le résultat à partir de février 1977 qui attire l'attention. A partir de cette date, le déficit est continu jusqu'à la fin de la série et ce déficit augmente de plus en plus sans s'atténuer (Figure 3.15). Ceci est dû très probablement à la longueur de la série. En effet, la pluie étant plus favorable dans le passé, les mois récents ont vu enregistré tous des précipitations défavorables. Comme l'indice de Pita cumule les déficits, la courbe reste descendante.

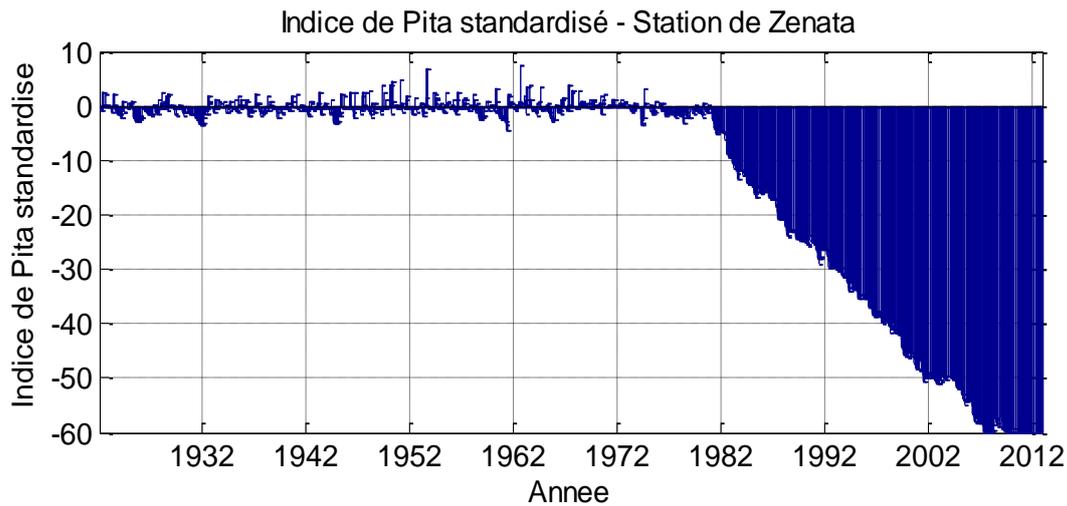


Figure 3.15 : Indice de Pita de la station de Zenata.

3.2. Méthodes de l'analyse fréquentielle

Le concept de l'analyse fréquentielle a été introduit pour la première fois par Gibbs et Mather [Gibbs et Mather, 1967 cité par WMO, 2010] pour étudier la sécheresse en Australie. La procédure consiste à ajuster les données selon une loi de probabilité donnée ou simplement les classer selon un ordre croissant et de les diviser en 5 classes, chaque classe contiendra 20% des données. Le positionnement des données en fonction de leurs appartenances aux différentes classes permet d'identifier si la région est sujette à la sécheresse ou pas et si cette sécheresse est persistante ou épisodique.

Pour permettre une meilleure exploitation des résultats de cette analyse, les graphiques suivants ont été tracés. Sur ces graphiques, les années humides et très humides ont été marquée en vert, les années sèches et très sèches en rouges et les années où la pluviométrie est proche de la normale en noir.

- Station de Maghnia

La figure 3.16 montre que la station de Maghnia n'a pas connu une sécheresse continue et sur une longue période même si deux périodes courtes de déficit pluviométrique sont enregistrées, de 1981/1982 à 1984/1985 et de 2004/2005 à 2997/2008.

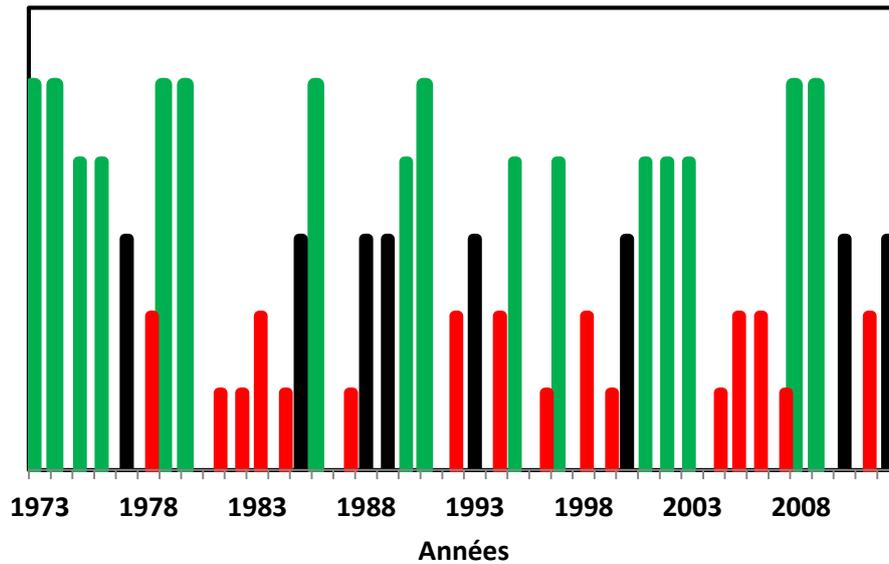


Figure 3.16 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Maghnia.

- Station de Hammam Boughrara

L'analyse fréquentielle appliquée à la station de Hammam Boughrara (Figure 3.17) montre que la période de déficit est plus longue puisque la période allant de 1981/1982 à 1990/1991 peut être considérée comme relativement sèche puisque sur cette période, sept (07) années sont classées comme très sèches, une année (01) classée sèche et deux (02) années classées comme ayant une pluviométrie normale.

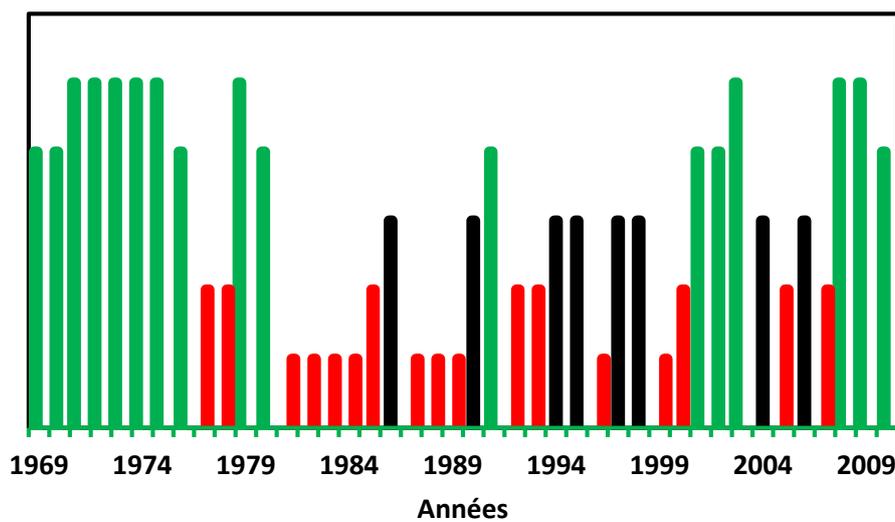


Figure 3.17 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Hammam Boughrara.

- Station de Béni Bahdel

Etant donné la longueur de la série, les périodes humides et sèches se distinguent nettement par rapport aux stations de Maghnia et de Hammam Boughrara (Figure 3.18). A partir de l'année 1975.1976, la sécheresse est plus ou moins continue avec quelques années humides ou très humides.

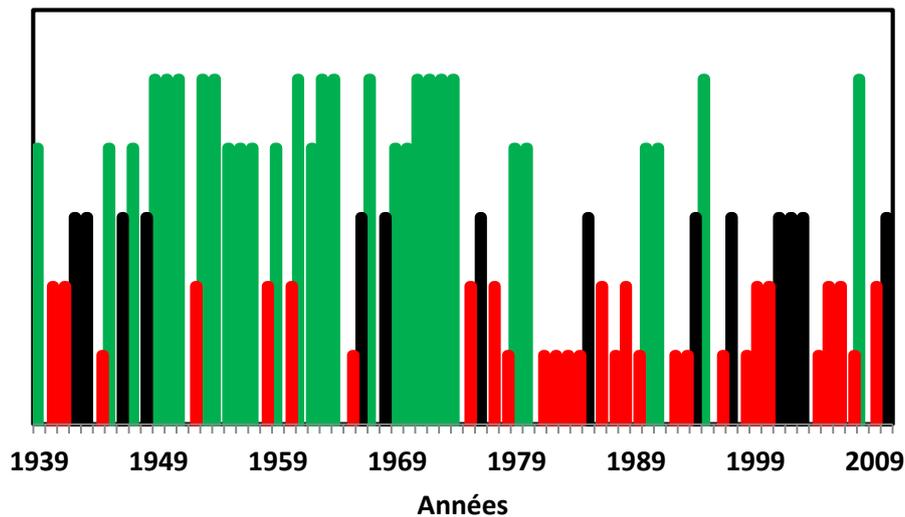


Figure 3.18 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Béni Bahdel.

- Station de Zenata

Avec la station de Zenata, les choses sont plus nettes. En effet, les données étant disponibles à partir de 1922/1923, la période humide est plus longue. Celle-ci s'étale de 1922/1923 à 1974/1975. A partir de 1975/1976 et jusqu'à 2012/2013, aucune année n'enregistre une pluie de classe humide ou très humide. Seules trois années sont de pluies normales. Ceci est très visible sur la figure 3.19 donnée ci-après.

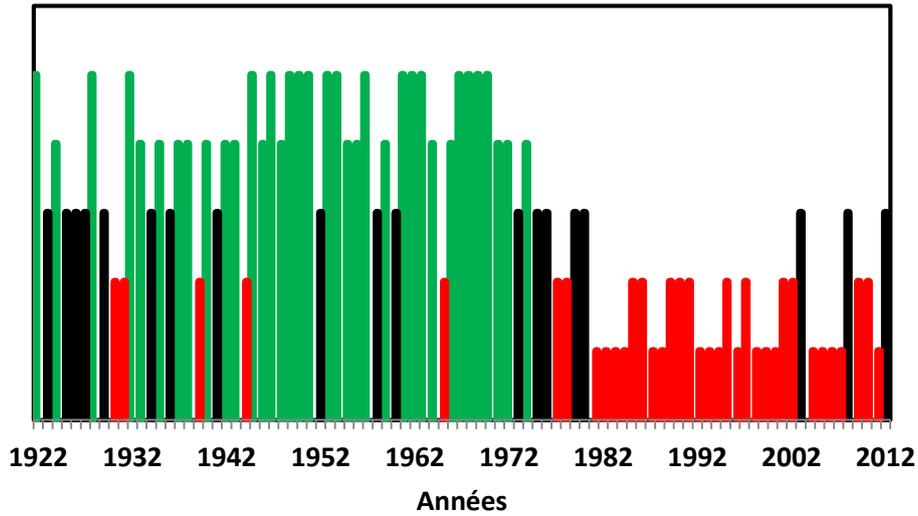


Figure 3.19 : Analyse fréquentielle appliquée à la station de Zenata.

3.3. Moyennes mobiles

Les moyennes mobiles sont des techniques utilisées pour étudier les tendances dans les séries chronologiques. Elles se divisent en des moyennes mobiles arithmétiques ou moyennes mobiles pondérées. Les premières ne privilégient aucune valeur par rapport aux autres alors que les secondes donnent un poids plus important à une valeur par rapport aux autres.

Ainsi, si X est une série chronologique, alors la moyenne mobile arithmétique est :

$$\bar{X} = \frac{X(t_1) + X(t_2) + \dots + X(t_n)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X(t_i)}{n}$$

n , dit ordre de la série doit être inférieure à N , la taille de la série.

Pour $n=1$, c'est les valeurs de la série et si $n=N$, c'est la moyenne classique de la série.

Souvent, c'est les ordres impairs qui sont préférés car ils permettent d'obtenir des moyennes mobiles centrées. Ainsi, une moyenne mobile centrée d'ordre 3 s'écrit :

$$\bar{X}_2 = \frac{X(t_1) + X(t) + X(t_3)}{3}$$

$$X_3 = \frac{X(t_2) + X(t_3) + X(t_4)}{3}$$

etc.

Ce calcul peut être répété autant de fois, de \bar{X}_2 jusqu'à \bar{X}_{N-1} .

Dans certains cas et pour des raisons diverses, certaines valeurs de la série dans la moyenne sont affectées d'un poids plus important par rapport aux autres. La moyenne mobile s'écrit dans ce cas :

$$\bar{X}_n = \frac{\beta_1 \cdot X(t_1) + \beta_2 \cdot X(t_2) + \dots + \beta_n \cdot X(t_n)}{\sum \beta_i} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \beta_i \cdot X(t_i)}{\sum \beta_i}$$

Les moyennes mobiles sont souvent utilisées pour étudier les tendances, éliminer les saisonnalités ou les fluctuations dans les séries chronologiques.

Dans le cas du présent travail, c'est la moyenne mobile centrée d'ordre 3 qui a été utilisée. Concernant les coefficients de pondération, c'est le filtre de Manning qui sera employé. Ce dernier donne la moyenne mobile M_{bi} au pas i par :

$$M_{bi} = 0,25 \times P_{i-1} + 0,5 \times P_i + 0,25 \times P_{i+1}$$

P_i est la pluie de l'année i .

Les résultats de l'application de cette moyenne mobile aux quatre séries de pluies utilisées dans cette étude sont représentés sur les figures suivantes.

Les résultats obtenus vont globalement dans le même sens que ceux obtenus par les autres méthodes, c'est-à-dire l'existence des deux périodes sèches et humides. La phase de sécheresse est plus marquée pour la station de Zenata (Figure 3.23), un peu moins dans la station de Béni Bahdel (3.22). Ceci est attribué principalement à la longueur des séries de mesures : Ces deux stations possèdent les séries les plus longues. Pour les deux autres stations où les séries sont relativement courtes, la période sèche est entrecoupée par quelques années de pluies moyennes à élevés (Figure 3.20 et Figure 3.21).

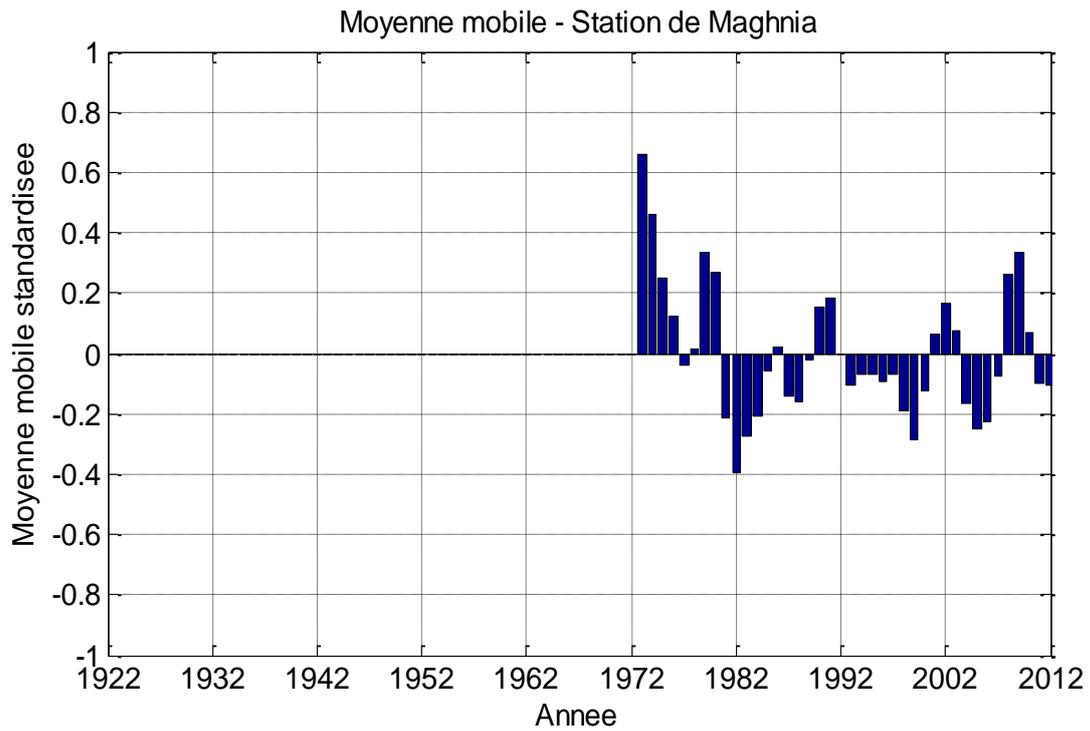


Figure 3.20 : Moyenne mobile appliquée à la station de Maghnia.

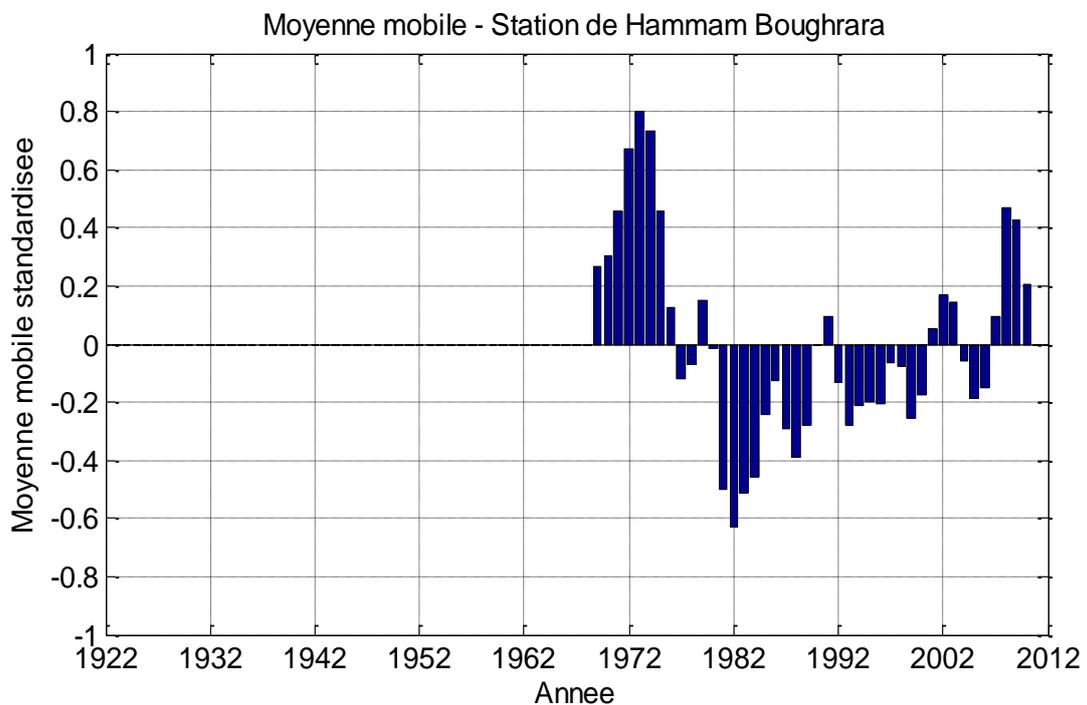


Figure 3.21 : Moyenne mobile appliquée à la station de Hammam Bougrara.

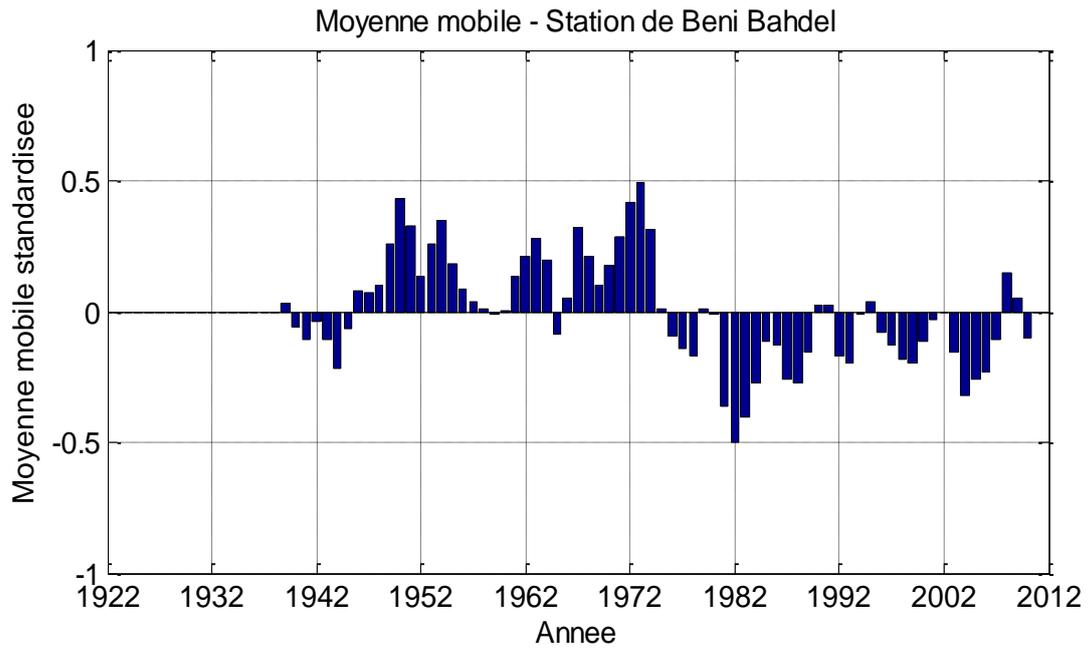


Figure 3.22 : Moyenne mobile appliquée à la station de Béni Bahdel.

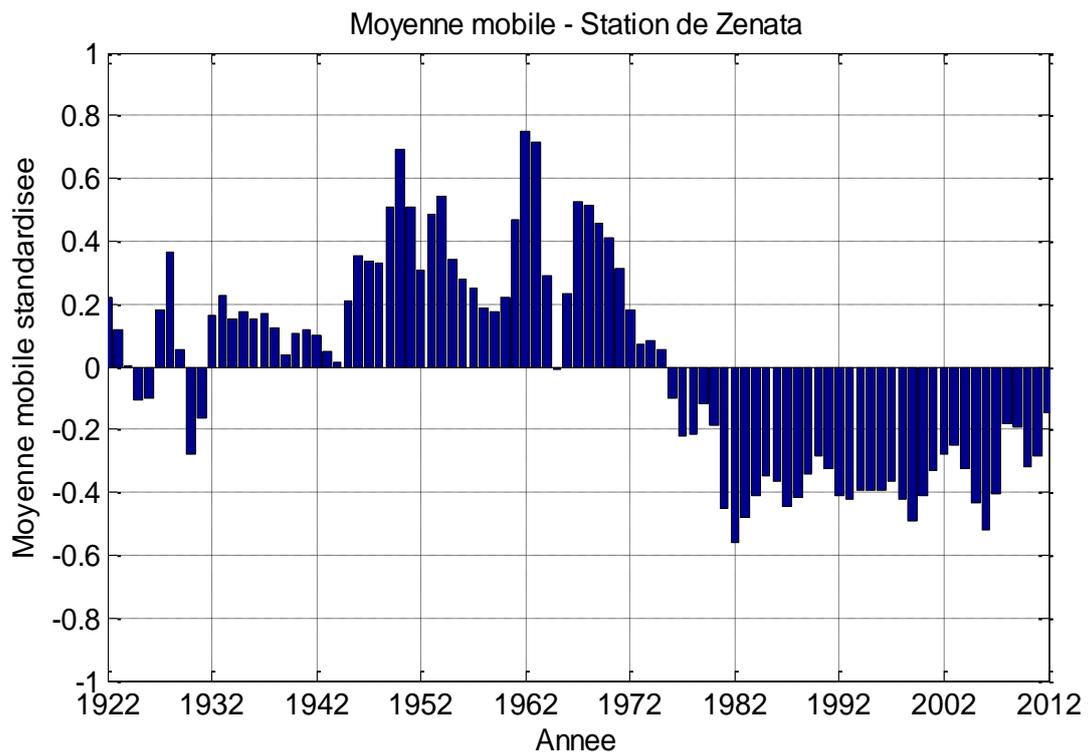


Figure 3.23 : Moyenne mobile appliquée à la station de Zenata.

3.4. Méthodes basées sur les tests statistiques

3.4.1. Introduction

Les méthodes utilisées précédemment se basent uniquement sur des indices calculés à partir des enregistrements de la pluie ou des débits pour estimer le degré de sévérité de la sécheresse. Ces indices donnent une indication sur le déficit de l'année examinée. La tendance est jugée en observant l'évolution de ces indices dans le temps. L'existence ou l'absence d'un changement dans le comportement de la série n'est décelé que qualitativement. Certains chercheurs ont développé des méthodes basées sur l'analyse statistique et des tests ont été mis au point pour permettre d'étudier les séries chronologiques et de déceler les éventuels changements dans le comportement de ces dernières : l'existence de tendance ou de saut. Ces méthodes ont fait l'objet d'une large utilisation particulièrement pour étudier les sécheresses en Afrique de l'Ouest, en Afrique du Nord et dans le sahel [Paturel et al., 1996 ; Paturel et al., 1998 ; Lubes-Niel, 1998 ; Hubert et al., 1998 ; Servat et al., 1998]. Ces régions ont été les plus touchées par les sécheresses les plus sévères lors des trente ou quarante dernières années.

Dans ce qui suit une synthèse sur ces méthodes et leurs applications aux séries sélectionnées sera donnée.

3.4.2. Autocorrélogramme et intervalle de confiance

L'autocorrélation d'une série chronologique mesure la corrélation entre une variable à l'instant t et les variables qui la précèdent ou qui la suivent. Le coefficient d'autocorrélation quantifie ce lien. Ce dernier est donné par :

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

Dans la relation ci-dessus, les x_i sont les observations de la série, \bar{x}_1^k est la moyenne de la sous-série des observations de $i=1$ à $i=k$. \bar{x}_2^k est la moyenne de la série des observations de $i=k+1$ à $i=N$.

Pour une série chronologique de grande taille et dont les observations sont aléatoires, le coefficient d'autocorrélation tend vers zéro (0). En réalité, même si le nombre des observations N est grand, si la série est aléatoire, le coefficient d'autocorrélation r_k suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $1/N$ [Chatfield, 1989 cité par Khaldi, 2005].

Il est donc possible de définir un seuil de confiance à partir duquel l'hypothèse nulle (H_0) pourrait être acceptée ou rejetée.

Pour un seuil de confiance $(1 - \alpha/2)$, la zone de confiance est limitée par :

$$\left[-\frac{U_{1-\alpha/2}}{\sqrt{N}} \text{ et } +\frac{U_{1-\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right]$$

En général, l'hypothèse nulle (H_0) est que la série est aléatoire. Dans ce cas, les points représentatifs de ce coefficient se trouveront à l'intérieur de l'intervalle de confiance. L'hypothèse alternative, c'est que les observations sont corrélées entre-elles, ce qui traduit souvent l'existence d'une tendance. Dans ce cas, les points représentatifs se trouveront à l'extérieur de l'intervalle de confiance.

Si quelques points sortent de ce domaine de validité de l'hypothèse nulle (H_0), le caractère aléatoire des données n'est pas forcément à remettre en cause. En effet, Khaldi [Khaldi, 2005] précise que pour les vingt premières valeurs de r_k (coefficient d'autocorrélation), il se pourrait que des valeurs sortent de la zone de confiance alors que la série est réellement aléatoire. L'acceptation de l'hypothèse de l'indépendance des valeurs des séries, les unes par rapport aux autres, stipule que ces séries ne présentent pas de tendance globale.

3.4.3. Test de corrélation sur le rang

Le test de corrélation sur le rang consiste à calculer le nombre N_p de paire (x_i, x_j) pour lequel $x_j > x_i$ avec $j > i$ et $i = 1, \dots, N - 1$.

Sous l'hypothèse nulle (H_0), la variable τ définie par :

$$\tau = \frac{4N_p}{N(N-1)} - 1$$

suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance :

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

Pour un risque α de première espèce donné, l'acceptation de (H_0) est défini par l'appartenance de τ à l'intervalle $[-U_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_t, U_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_t]$. $U_{1-\alpha/2}$ désigne la valeur de la variable normale réduite de probabilité de non dépassement $(1 - \alpha/2)$. Si l'hypothèse (H_0) est acceptée, la série est aléatoire. L'hypothèse alternative est la présence d'une tendance.

3.4.4. Test de Buishand et ellipse de Bois

La statistique de Buishand s'appuie sur le cumul de l'écart par rapport à la moyenne [Buishand, 1982]. En effet, cette dernière s'écrit :

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

Avec :

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

et

$$D_x^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N$$

Après une première version des valeurs critiques de la statistique basée sur la méthode de Monte Carlo, de meilleures estimations sont parues plus tard [Buishand, 1984].

En général, à cette méthode est jumelée la méthode de l'ellipse de Bois. Cette dernière est une extension de la méthode des résidus cumulés de la régression linéaire qui servait à tester l'homogénéité d'une série par rapport à une autre.

Dans le cas présent, c'est le cumul des résidus qui représente la stationnarité de la série. Si la série est stationnaire, la somme cumulée des résidus k a pour intervalle de confiance :

$$\left[-U_{1-\alpha/2} \cdot \sigma \sqrt{\frac{k(n-k)}{n-1}} ; + U_{1-\alpha/2} \cdot \sigma \sqrt{\frac{k(n-k)}{n-1}} \right]$$

C'est l'équation d'une ellipse : c'est l'ellipse de Bois.

3.4.5. Test de Pettitt

Le test de Pettitt est un test non-paramétrique, donc robuste, qui dérive du test de Mann-Whitney. En fait, la démarche adoptée consiste à supposer que si une série chronologique $X(x)$ qui a N valeurs admet une rupture au pas de temps ξ , alors la première partie de la série (de 1 à ξ) suit une distribution $F_1(x)$ et la seconde partie de la série (de $\xi + 1$ à N) suit une autre distribution $F_2(x)$ différente de la première.

La mise en œuvre ce test consiste à calculer la variable :

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

Avec :

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$$

La fonction $\text{sgn}(x)$ prend les valeurs suivantes :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

La statistique $U_{1,N}$ est considérée pour des valeurs de t allant de 1 à N . Pour tester l'hypothèse d'absence de rupture (H_0) contre l'hypothèse alternative (H_1), Pettitt propose d'utiliser la variable :

$$K_N = \max[U_{t,N}]$$

En utilisant la théorie des rangs, Pettitt donne la probabilité de dépassement approximative d'une valeur k par :

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

Pour un risque α de première espèce, l'hypothèse (H_0) est rejeté si cette probabilité est inférieure à α . Dans le cas contraire, la série présente une rupture au pas $t = \xi$.

3.4.6. Segmentation de Hubert

La technique développée par Hubert consiste à diviser la série temporelle en plusieurs sous-séries et à l'aide de la technique des moindres carrés et du test de Scheffe, estimer si la différence entre les moyennes des sous-séries successives est significative ou pas. Dans l'affirmative, il existe une rupture dans la série complète. Cette technique a l'avantage de déceler l'existence de plusieurs ruptures. Pour l'application de cette méthode, la normalité de la distribution de la série initiale est exigée.

Soit une série chronologique $X(x)$ de N observations. Cette série est divisée en M sous séries. Le principe consiste à calculer l'écart quadratique D_M entre la série originelle et la sous série considérée. Cette dernière s'écrit :

$$D_M = \sum_{k=1}^M d_k$$

Avec :

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2$$

d_k est l'écart quadratique de la sous série k considérée, \bar{x}_k étant la moyenne de cette sous série.

Le paramètre i_k est le rang du dernier élément de la sous série dans la série originelle.

Le principe consiste à minimiser l'écart quadratique D_M . Si par exemple une première segmentation donne un écart D_R qui donne R sous séries. Alors, il faut tester une nouvelle segmentation d'ordre $(R + 1)$. Si l'écart D_{R+1} est inférieur à D_R , il faut passer à l'ordre $(R+2)$. Dans le cas contraire, la segmentation d'ordre R est la bonne.

Il faut rappeler que c'est le test de Scheffé qui est utilisée pour tester la significativité de la différence entre les écarts quadratiques successifs.

3.4.7. Application aux stations retenues

- **Station de Hammam Bouhrara**
 - **Autocorrélogramme et test sur le rang :**

Le test de corrélation sur le rang appliqué à la station de Hammam Bouhrara accepte l'hypothèse nulle, c'est-à-dire que la série est constituée de variables aléatoires. Ce résultat est confirmé par le coefficient d'autocorrélation dont la représentation est donnée sur la figure 3.24 ci-après. Les points représentatifs sont tous à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Quand le coefficient d'autocorrélation est important au pas de décalage 1 par rapport aux autres, il est très fort probable que la série ne soit pas stationnaire et qu'il existerait une tendance ou une forte fluctuation.

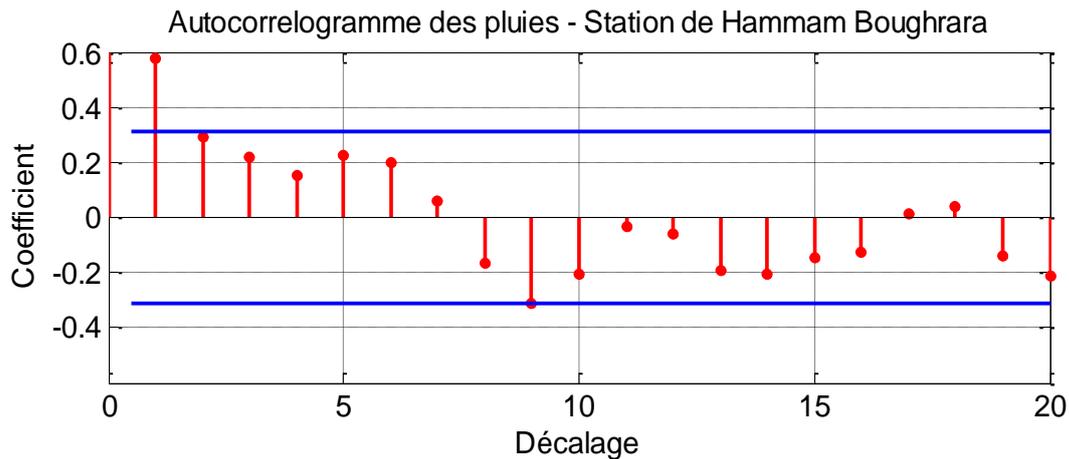


Figure 3.24 : Autocorrélogramme des pluies de la station de Hammam Boughrara.

• Recherche de ruptures :

Les tests de Buishand (Figure 3.25) et de Pettitt rejettent la présence de rupture pour un seuil de confiance de 99%. Par contre, ils l'acceptent pour les seuils de confiance de 90% ou de 95%. Le test de Pettitt situe la rupture en l'année 1980/1981. La méthode bayésienne de Lee et Heghinian positionne la rupture en l'année 1975/1976. La méthode de segmentation de Hubert (Figure 3.26) détecte deux ruptures, la première en l'année 1975/1976 et la deuxième en l'année 2007/2008.

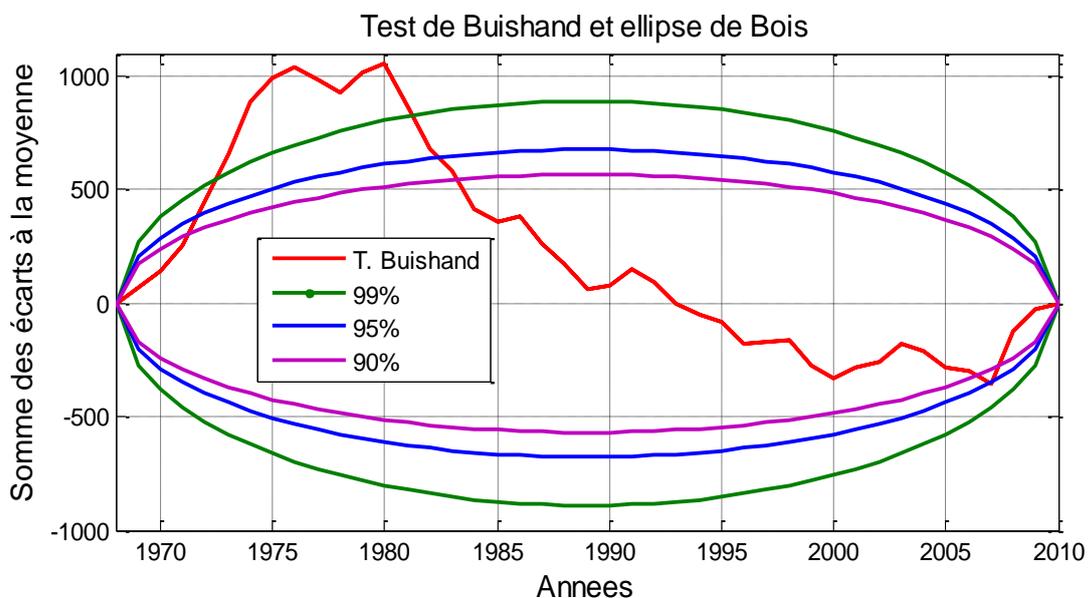


Figure 3.25 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Hammam Boughrara.

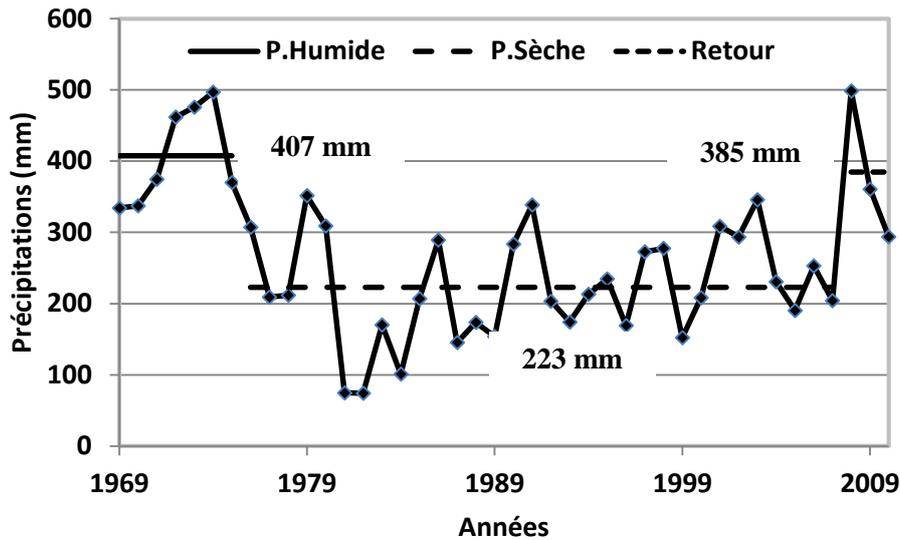


Figure 3.26 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Hammam Boughrara.

Cette dernière rupture correspond à un éventuel retour de la pluie que certains auteurs avancent [Nouaceur, 2011]. Ce retour est en principe hypothétique car il faut attendre quelques années et disposer de données supplémentaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

▪ Station de Maghnia

• Autocorrélogramme et test sur le rang :

Pour cette station, les résultats du test de corrélation sur le rang ainsi que le l'autocorrélogramme ont été donnés en page 22 du chapitre 2. Ces résultats confirment que la série est aléatoire.

• Recherche de ruptures :

Les tests de Buishand (Figure 3.27) et de Pettitt ne détectent pas de rupture dans la série des précipitations de la station de Maghnia pour les trois seuils de confiance testés 90%, 95% et 99% alors que la méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de segmentation de Hubert donnent chacune une rupture mais pas à la même date. En effet, la méthode de Lee et Heghinian positionne la rupture en 1974/1975 alors que la méthode de Hubert la situe en 1980/1981 (Figure 3.28).

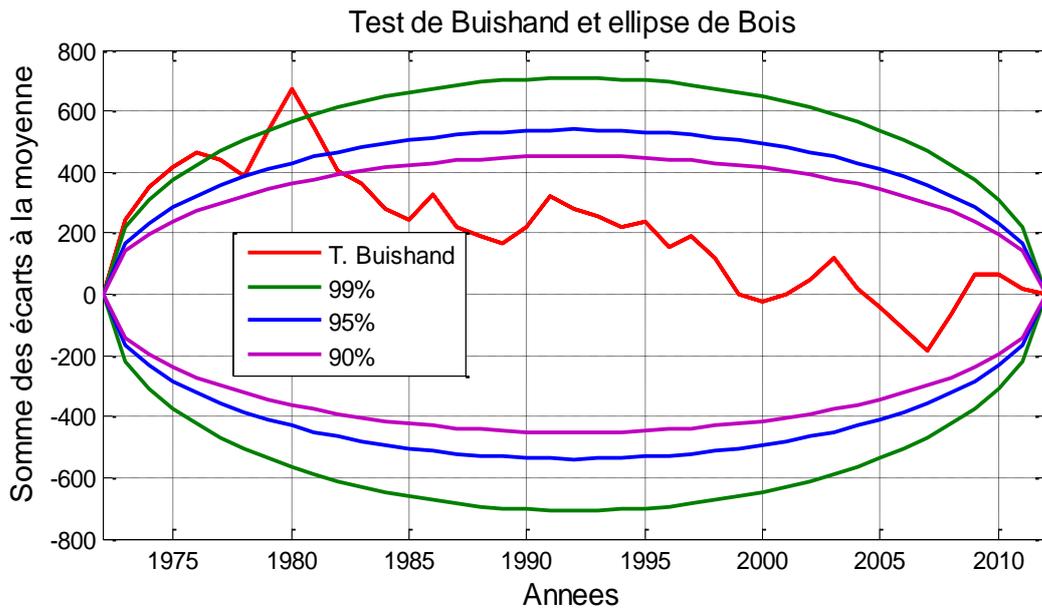


Figure 3.27 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Maghnia.

Il faut noter que la procédure de Lee et Heghinian a simplement isolé les deux premières années de la série dont la pluviométrie est notable par rapport au reste et les a classés comme humides. Le reste de la série a été classé comme appartenant à la période sèche.

Peut-être que les difficultés rencontrées dans l'étude de cette station ont de forts liens avec le fait que le fonctionnement de celle-ci a démarré en 1973/1974, date à laquelle la majorité des stations de la région ont enregistré des ruptures.

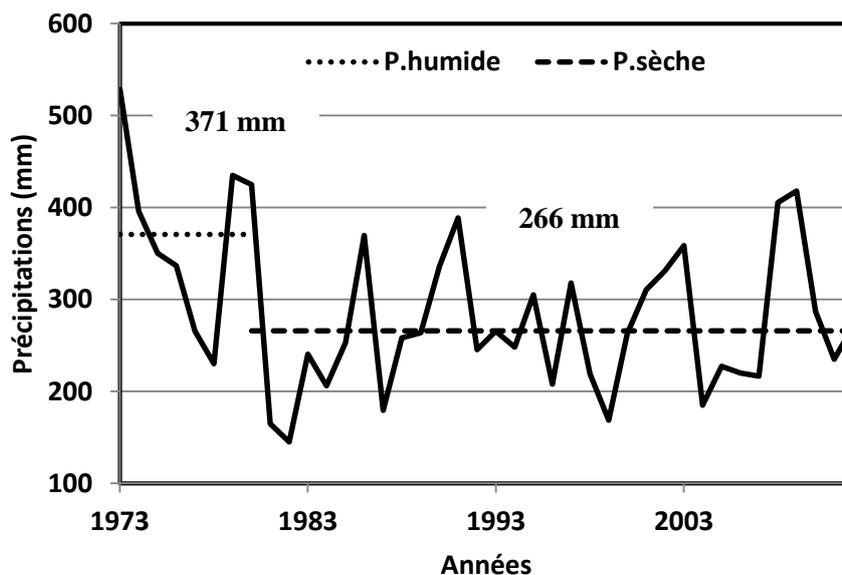


Figure 3.28 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Maghnia.

- **Station de Béni Bahdel**

- **Autocorrélogramme et test sur le rang :**

Pour cette station, le coefficient d'autocorrélation montre que la série est constituée de données aléatoires. La figure 3.29 ci-dessous illustre ce résultat. Par contre, le test de corrélation sur le rang donne l'existence d'une liaison entre les variables, stipulant l'existence d'une tendance.

Ce résultat n'est pas contradictoire dans la mesure où des points sortent du domaine de validité de l'hypothèse nulle sachant que ce seuil a été fixé à 95%.

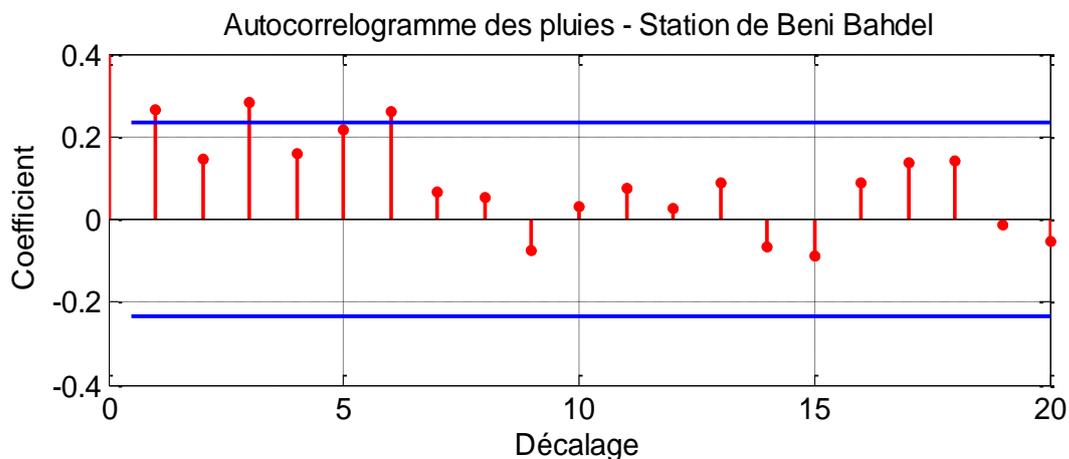


Figure 3.29 : Autocorrélogramme de la station de Beni Bahdel.

- **Recherche de ruptures :**

La série de données s'ajustant à la loi normale, tous les tests statistiques ont été appliqués et tous confirment la présence d'une rupture. Les tests qui donnent la date de la rupture, le test de Pettitt, le test de Lee et Heghinian et la procédure de Hubert (Figure 3.31) situent cette rupture en 1974/1975.

La segmentation de Hubert qui permet de détecter l'existence de plusieurs ruptures ne détecte pas celle de 2007/2008 proposée pour la station de Hammam Boughrara malgré le fait que les deux séries s'arrêtent en 2010/2011.

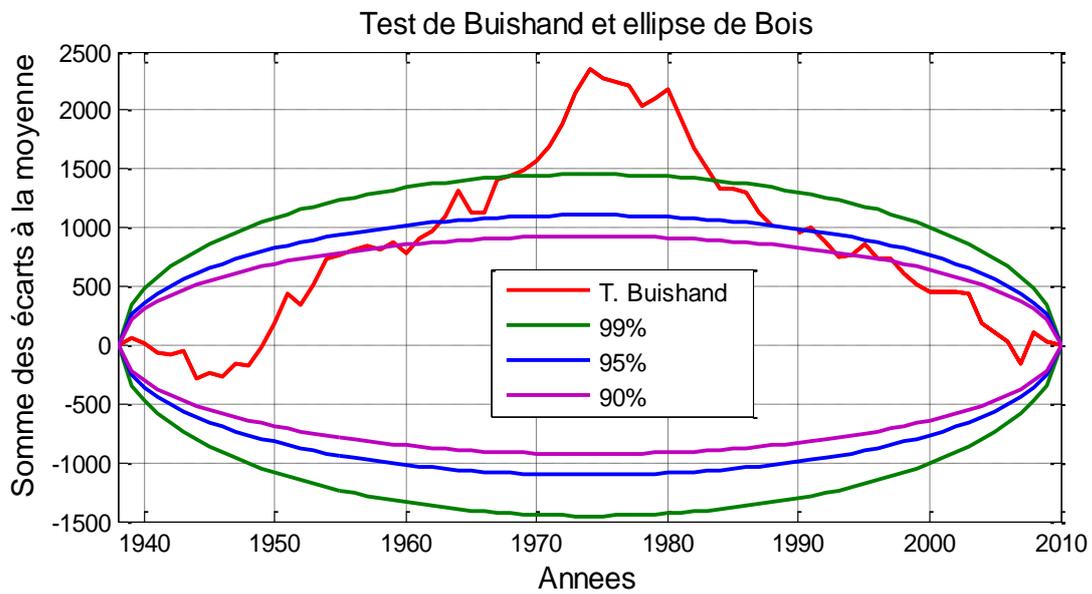


Figure 3.30 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliquée à la station de Beni Bahdel.

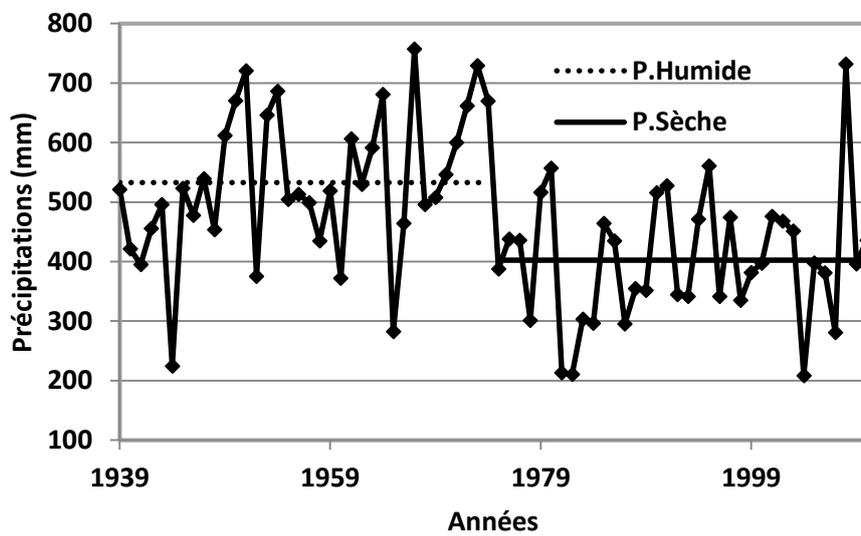


Figure 3.31 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Béni Bahdel.

- **Station de Zenata**

- **Autocorrélogramme et test sur le rang :**

Comme l'a montré l'autocorrélogramme donné sur la figure 2.4 du chapitre 2, le test de corrélation sur le rang confirme que les précipitations enregistrées à la station de Zenata sont fortement corrélées. La présence de tendance ou de rupture est à attendre dans cette série.

- **Recherche de ruptures :**

Les méthodes exigeant la normalité de la distribution des données n'ont pu être appliquées car la série des données de Zenata ne suit pas cette distribution. Les différents tests appliqués ont rejeté cette hypothèse. Des transformations ont été appliquées aux données (logarithme, racine, etc.) ont été appliquées et les résultats sont restés toujours négatifs.

Par contre, le test de Pettitt et la segmentation de Hubert ont pu être appliqués. Le premier détecte une seule rupture et la situe en 1975/1976. La seconde méthode a révélé trois ruptures, elle a donc divisé la série de mesures en quatre segments (Figure 3.32).

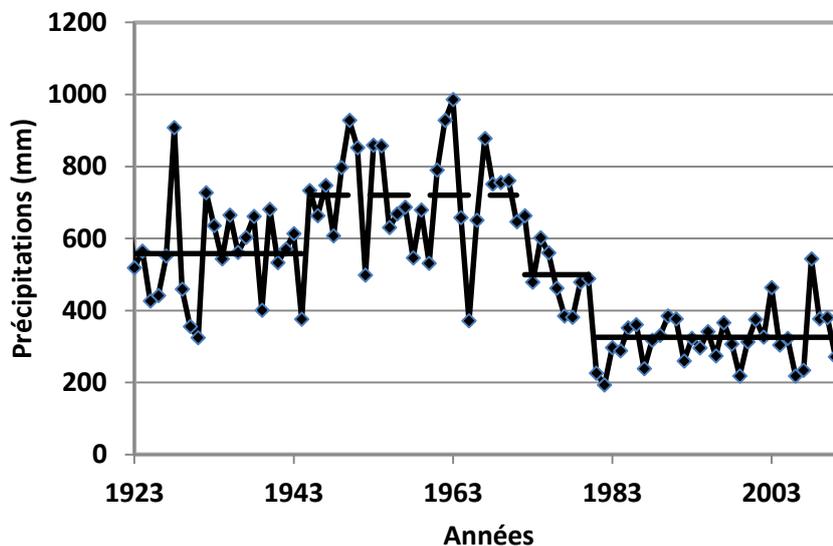


Figure 3.32 : Procédure de segmentation appliquée à la station de Zenata.

3.5. Etude et examen des débits

3.5.1. Introduction

La série des apports du barrage Hammam Boughrara s'étale de 1925/1926 à 1983/1984. La série est donc ancienne, malheureusement elle ne couvre pas les années récentes. Elle sera quand même utilisée pour étudier la variabilité interannuelle des apports pour éventuellement comparer les périodes sèches des débits et des pluies. Il faut rappeler que c'est sur la base de cette série que l'étude du barrage Hammam Boughrara a été réalisée.

3.5.2. Autocorrélogramme et test sur le rang

L'autocorrélogramme (Voir figure 3.33) ainsi que le test sur le rang autorisent à considérer la série comme constituée de variables aléatoires. Le test Khi-2 accepte l'ajustement à la distribution normale alors que le test de Kolmogorov-Smirnov le rejette. Par contre, les deux tests acceptent un ajustement à la loi Log-normale. Les figures 3.34 et 3.35 ci-dessous montrent que la série s'ajuste mieux à une distribution Log-normale.

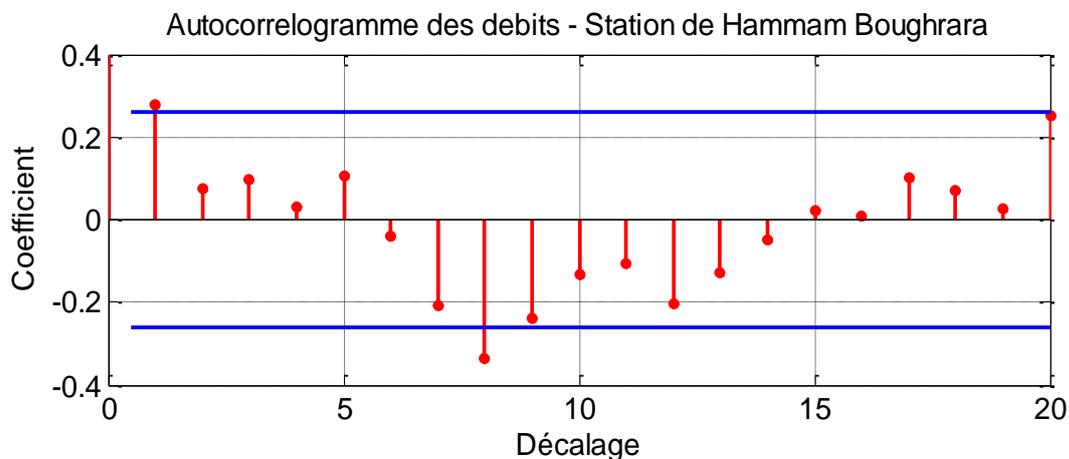


Figure 3.33 : Autocorrélogramme des débits de la station de Hammam Boughrara.

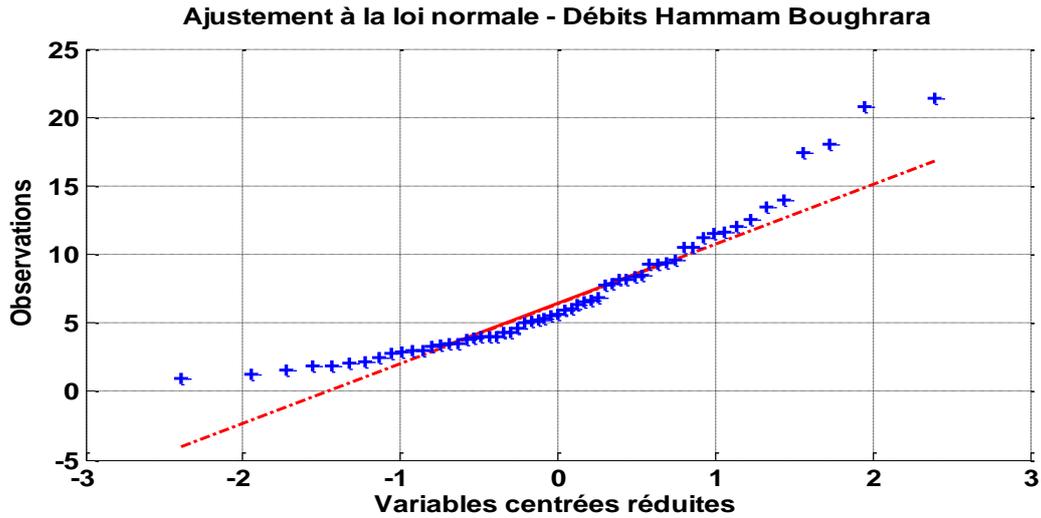


Figure 3.34 : Ajustement à la distribution normale des débits de la station de Hammam Boughrara.

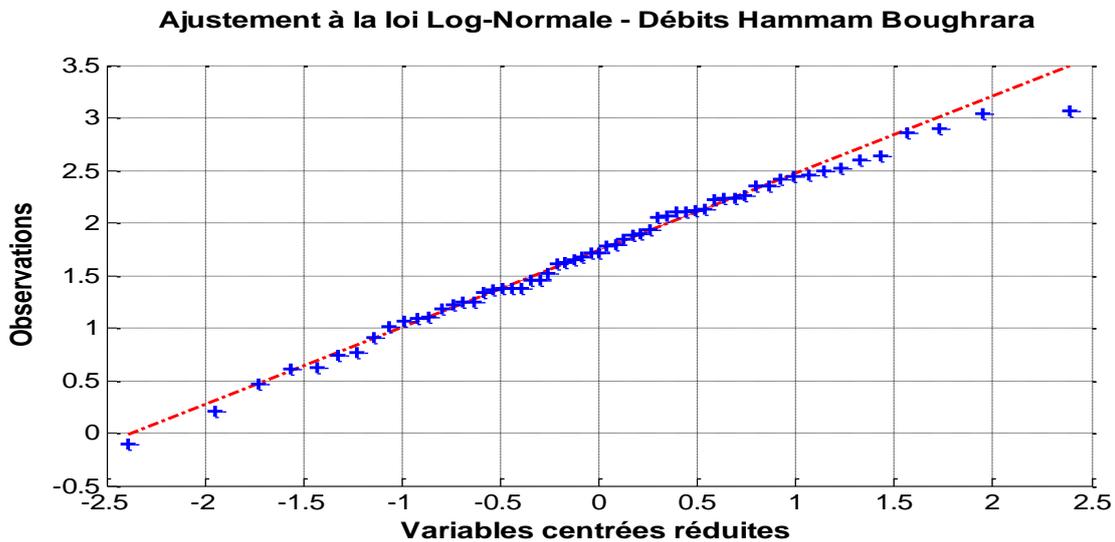


Figure 3.35 : Ajustement à la distribution Log-normale des débits de la station de Hammam Boughrara.

3.5.3. Etude de la variabilité par les indices

Les figures données ci-après représentent l'écart standardisé à la moyenne (Figure 3.36), l'indice des précipitations normalisé – SPI (Figure 3.37), la moyenne mobile (Figure 3.38) et le cumul des écarts à la moyenne (3.39).

Ces figures montrent qu'il y'a des cycles humides et des cycles secs qui se succèdent les uns aux autres. Les cycles secs sont légèrement plus longs, de même que les années sèches sont plus nombreuses. La sécheresse des années 40 et celle des années 70 sont retrouvées mais les

dates sont peu précises. Pour la sécheresse des années 70, la série ne va pas loin dans le temps pour évaluer son impact et sa sévérité.

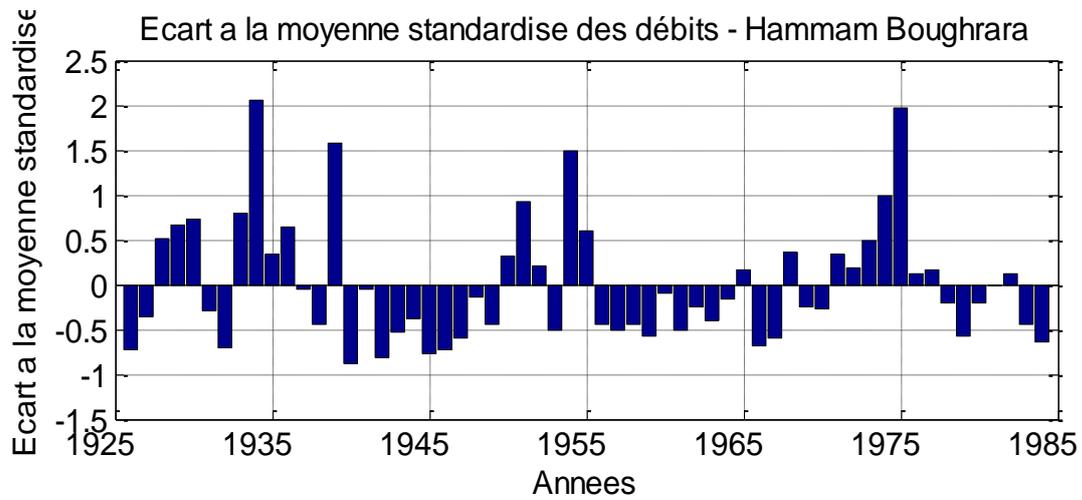


Figure 3.36 : Ecart standardisé à la moyenne des débits de Hammam Boughrara.

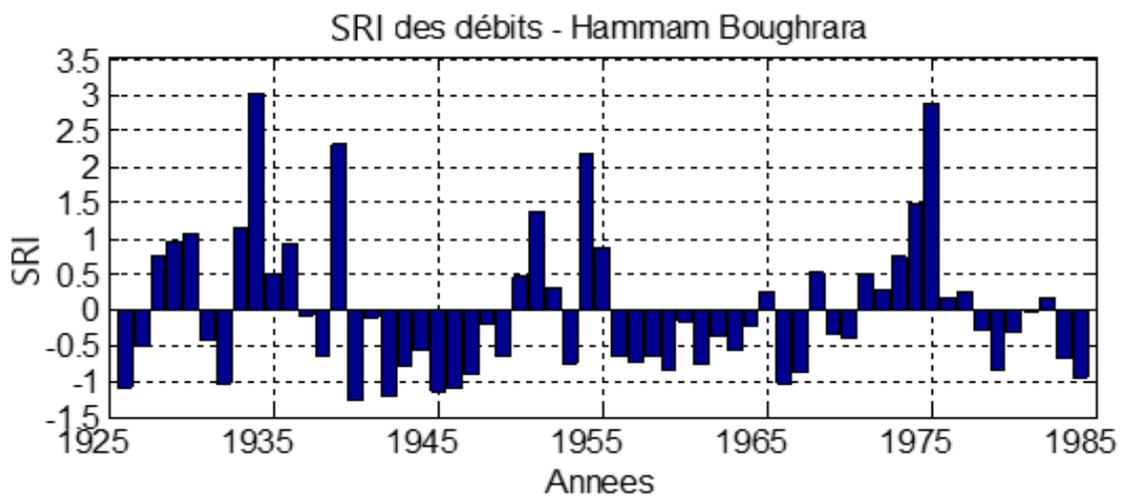


Figure 3.37 : Le SRI des débits de Hammam Boughrara.

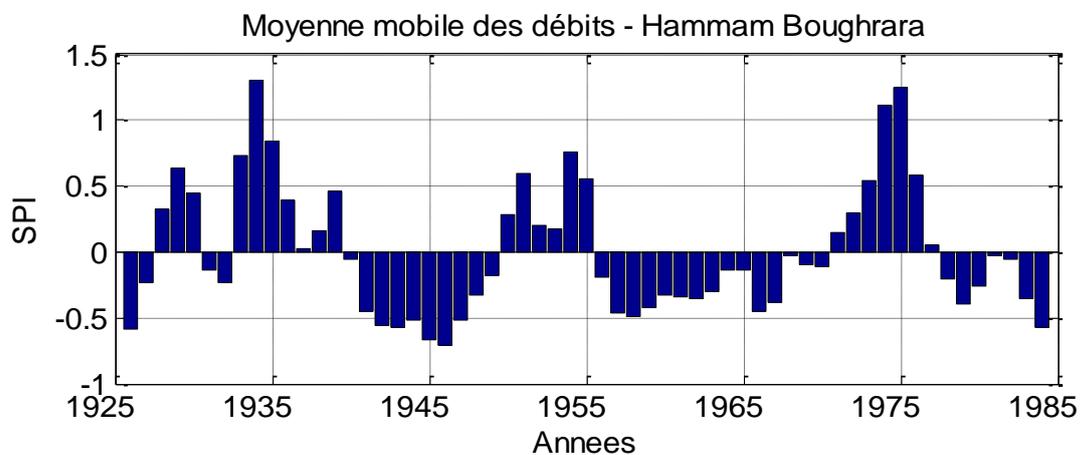


Figure 3.38 : Moyenne mobile des débits du barrage Hammam Boughrara.

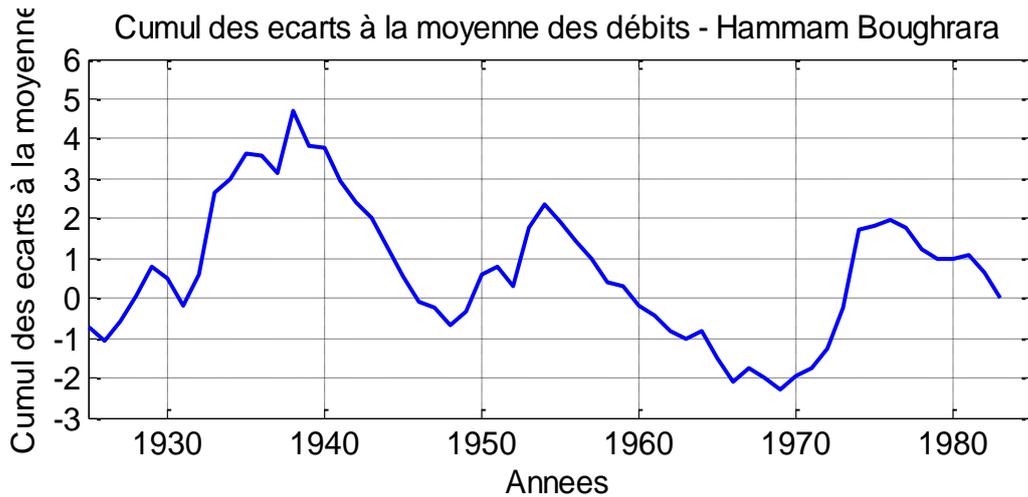


Figure 3.39 : Cumul des écarts à la moyenne des débits du barrage Hammam Bouhrara.

3.5.4. Recherche des ruptures

Contrairement aux constatations précédentes, aucun test utilisé dans cette étude n’a décelé de ruptures dans la série des débits. Ceci est dû très certainement aux fluctuations relativement nombreuses. En effet, la moyenne mobile et le cumul des écarts par rapport à la moyenne suggèrent la présence d’une alternance de cycles secs et humides. Cette alternance fait que ces cycles ne sont pas retrouvés par les tests statistiques.

La figure 3.40 qui donne le résultat du test de Buishand et l’ellipse de Bois avec un intervalle de confiance de 95% montre que la courbe reste confinée dans l’intervalle limitée par l’ellipse.

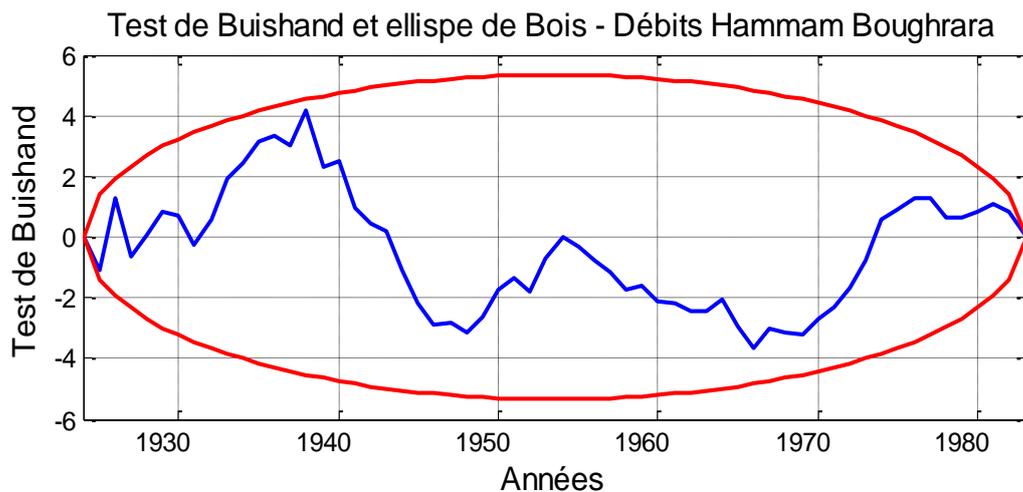


Figure 3.40 : Test de Buishand et ellipse de Bois appliqués aux débits du barrage Hammam Bouhrara.

3.6. Etude et examen des températures

3.6.1. Introduction

Comme il a été mentionné dans le chapitre 2, les séries de températures disponibles sont celles des stations de Maghnia et de Zenata. Ces séries s'étalent à peu près sur la même période. Cette étude se basera donc sur ces séries pour confirmer ou infirmer les constatations observées sur les séries de pluies.

Il faut noter que les tests de Khi-2 et de Kolmogorov-Smirnov valident le fait que les données des deux séries s'ajustent correctement à la distribution normale (Figure 3.41 et figure 3.42).

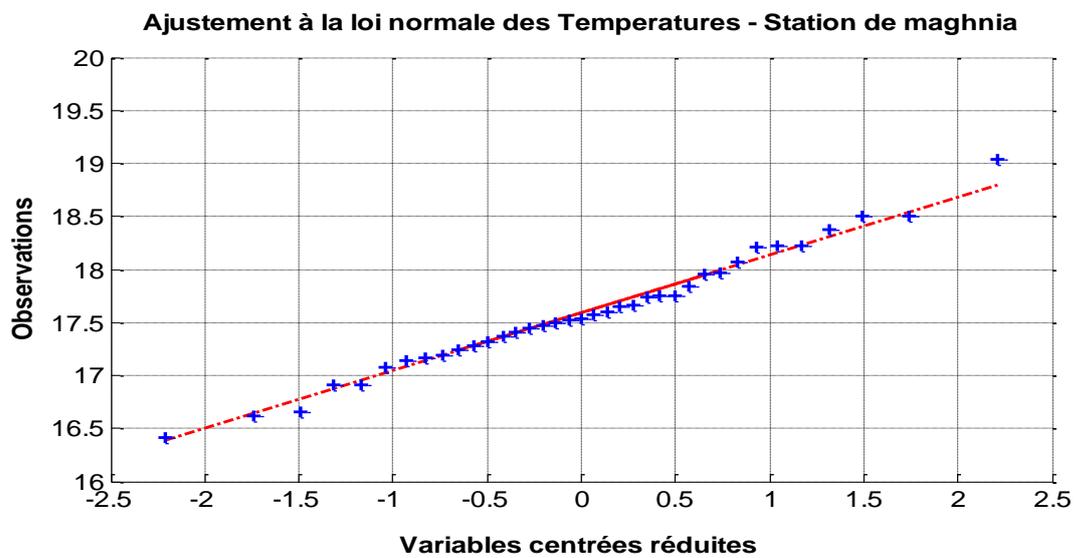


Figure 3.41 : Ajustement à la loi normale des températures de la station de Maghnia.

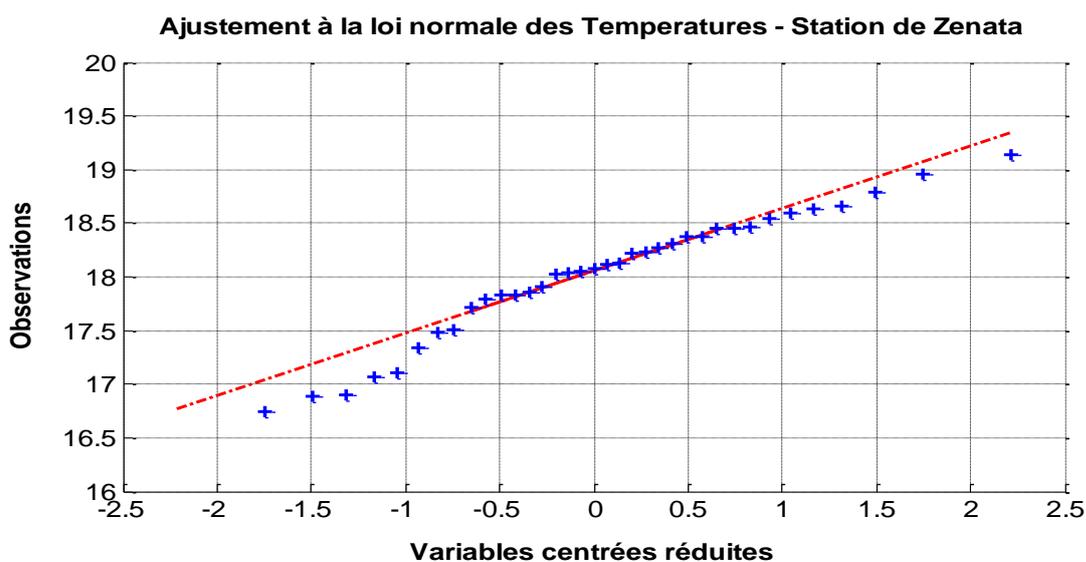


Figure 3.42 : Ajustement à la loi normale des températures de la station de Zenata.

3.6.2. Autocorrélation et test sur le rang

Le calcul des coefficients d'autocorrélation montre que les séries ne peuvent pas être considérées comme aléatoires, les points représentatifs de ces coefficients (Figures 3.43 et 3.44) sont presque tous à l'extérieur de l'intervalle de confiance fixé à 95%.

Cette constatation est confirmée par le test de corrélation sur les rangs qui rejette l'hypothèse de variables aléatoires pour les données des deux séries.

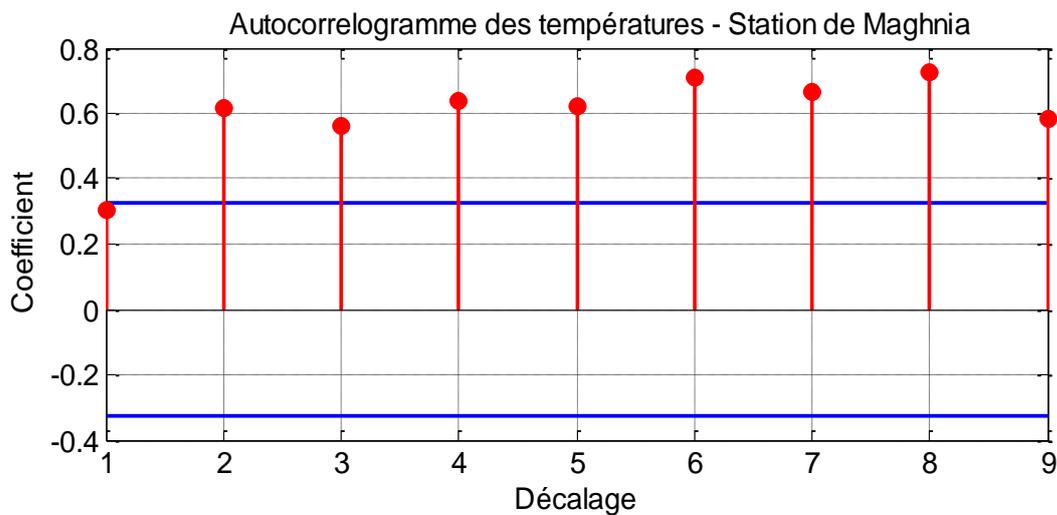


Figure 3.43 : Autocorrélogramme des températures de la station de Maghnia.

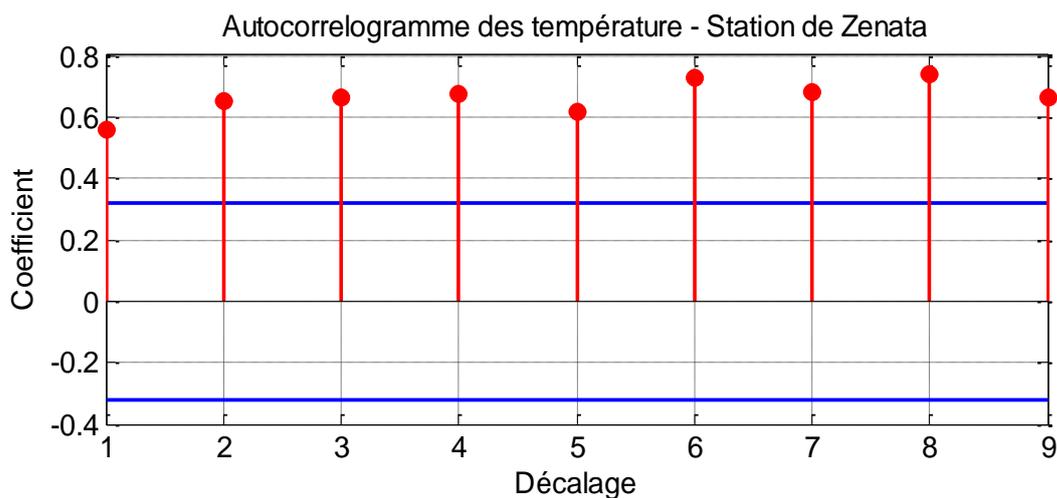


Figure 3.44 : Autocorrélogramme des températures de la station de Zenata.

3.6.3. Recherche de rupture

Les tests statistiques de recherche des ruptures dans les séries utilisées ont été appliqués aux deux séries et se sont tous révélés positifs, c'est-à-dire qu'ils détectent des ruptures.

Ainsi, pour la station de Maghnia, le test de Buishand rejette l'absence de rupture. Le test de Pettitt et celui de Lee et Heghinian confirment la présence d'une rupture, le premier la situe en 1999/2000 et le second la positionne en 2001/2002. La technique de segmentation de Hubert décèle une rupture 2001/2002 (Figure 3.45).

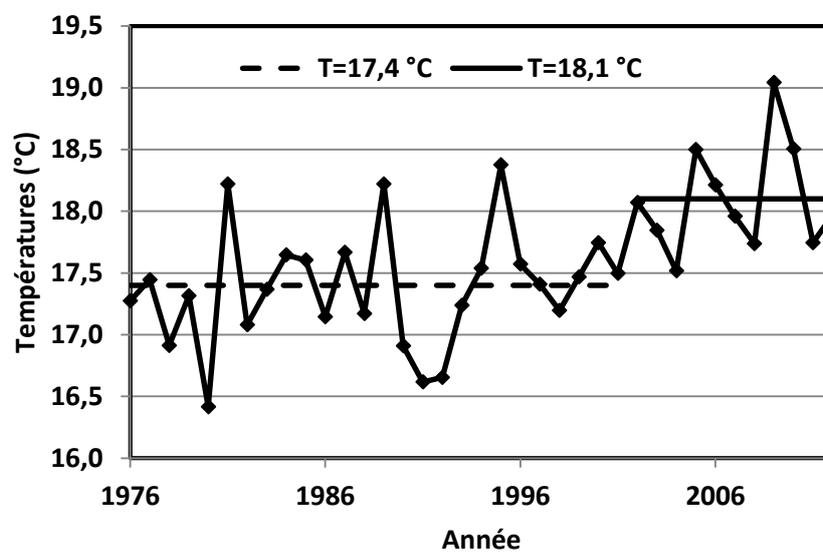


Figure 3.45 : Technique de segmentation de Hubert appliquée aux températures de la station de Maghnia.

Pour la série de Zenata, le test de Buishand rejette l'absence de rupture. Le test de Pettitt et celui de Lee et Heghinian confirment la présence d'une rupture, le premier la situe en 1986/1987 et le second la positionne en 1983/1984. La technique de segmentation de Hubert décèle deux ruptures, la première en 1980/1981 et la seconde en 1993/1984/ (Figure 3.46).

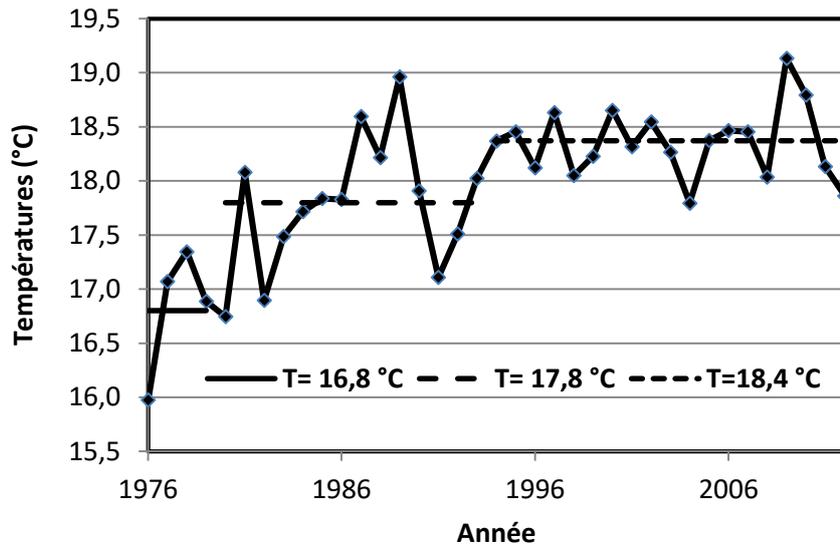


Figure 3.46 : Technique de segmentation de Hubert appliquée aux températures de la station de Zenata.

4. Etude de projection des conditions climatiques

7.1. Introduction

Dans ce qui a précédé, il a été question surtout de détecter et de caractériser par différentes techniques les éventuelles périodes de sécheresses sur des temps passés. Dans ce point, il sera question d'une projection sur un avenir à court et moyen terme des températures et des précipitations pour conforter l'idée que la région subit un changement climatique ou pas. La technique utilisée sera basée sur le modèle « ARIMA » (Autoregressive Integrated Moving Average). La modélisation sera effectuée sur les précipitations et les températures annuelles.

D'une manière générale, les modèles ARIMA combinent les trois types de processus aléatoires, la contribution de chacun d'eux étant précisée par la notation ARIMA(p,d,q) [Desbois, 2005], où p est l'ordre du processus autorégressif AR(p), d le degré d'intégration d'un processus I(d) et q l'ordre de la moyenne mobile MA(q).

7.2. Les processus autoregressifs

Dans les processus autoregressifs, la variable de la série à l'instant t est déterminée par les valeurs de cette variable aux instants précédents. Le processus sera dit d'ordre p si :

$$x_t = \mu + \varphi_1 \cdot x_{t-1} + \varphi_2 \cdot x_{t-2} + \dots + \varphi_p \cdot x_{t-p} + \varepsilon_t$$

Finalement la variable x_t est une fonction linéaire des x_i , i variant de (t-1) à p, ε_t est une perturbation aléatoire et μ est la constante du modèle.

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ sont les coefficients de la régression.

7.3. Les processus intégrés

Un modèle autoregressif est dit intégré d'ordre 1 si la variable à l'instant t ne dépend que de cette même variable à l'instant précédent et que ce processus est stationnaire. Dans ce cas :

$$x_t = x_{t-1} + \varepsilon_t$$

ε_t est un bruit blanc.

Si la condition de stationnarité n'est pas vérifiée, la différentiation sera poursuivi jusqu'à l'obtention de la stationnarité du bruit blanc. Le processus sera dit d'ordre « d » quand le processus aura nécessité « d différentiation » pour obtenir le bruit blanc.

Le bruit blanc est un processus stationnaire dont les accroissements sont indépendants et stationnaires [Desbois, 2005].

7.4. Les moyennes mobiles

Les moyennes mobiles ont été déjà mentionnées dans la partie relative à la caractérisation de la sécheresse et notamment dans la recherche de tendance à court terme. Dans le processus ARIMA, la valeur de la variable x_t à l'instant t est écrite en fonction des erreurs ayant entachée les valeurs précédentes comme écrit ci-dessous :

$$x_t = \mu - \beta_1 \cdot x_{t-1} - \beta_2 \cdot x_{t-2} - \dots - \beta_q \cdot x_{t-q} + \varepsilon_t$$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ sont les coefficients de la moyenne mobile

7.5. Utilisation des modèles ARIMA

Pour pouvoir appliquer un modèle ARIMA à une série temporelle, il faut déterminer les différents paramètres du modèle et s'assurer en même temps des conditions à vérifiées. Les étapes nécessaires sont :

1. La première étape consiste à spécifier le modèle pour ensuite déterminer ses paramètres (p, d, q) ceci à l'aide d'abord de l'examen des diagrammes des fonctions d'autocorrélation.
2. La seconde étape consiste à déterminer les paramètres (φ_i) et (β_i).
3. La troisième étape consiste à valider le modèle ceci s'assurant que les résidus des estimations du modèle constituent effectivement un bruit blanc.

4.6. Application des modèles ARIMA

4.6.1. Stationnarisation des séries temporelles

Une première étape préliminaire de la modélisation consiste à extraire du signal toute tendance temporelle. Pour cela, il faut déterminer le paramètre (b) qui caractérise la tendance. De l'équation :

$$X(t) = a + b.t + \varepsilon_t$$

$X(t)$ représente les séries temporelles relatives aux températures et aux précipitations.

Concernant les températures, l'analyse donne des coefficients b positifs montrant que la tendance est à l'augmentation. Les coefficients de corrélations sont faibles mais acceptables pour des variables aléatoires comprenant des fluctuations naturelles. Les valeurs de t de Student donnent des valeurs supérieures à 2 indiquant que l'hypothèse de la tendance est confirmée (Tableau 3.4 ci-dessous) avec un taux de confiance de 99%.

Tableau 3.4 : Analyse de la tendance des températures.

Variabes	Température de la station de Zenata	Température de la station de Maghnia
Année	0.0449***	0.0286***
	(5.445)	(4.335)
Constant	-71.56***	- 39.54***
	(- 4.354)	(-3.001)
Observations	38	38
Coefficient de corrélation (R²)	0.452	0.343

C'est le même cas pour les précipitations, les coefficients (b) sont négatifs indiquant une diminution et que le test de Student des précipitations de la station de Maghnia donne une valeur faiblement significative mais reste acceptable pour une telle analyse. Le tableau 3.5 suivant résume les valeurs obtenues pour cette analyse.

Tableau 3.5 : Analyse de la tendance des précipitations.

Variables	Température de la station de Zenata	Température de la station de Maghnia
Année	-0.340	-0.127
	(-6.082)	(-1.296)
Constant	712.9	277.8
	(6.474)	(1.418)
Observations	91	40
Coefficient de corrélation (R^2)	0.294	0.042

La tendance déterminée, il faut stationnariser les séries par différentiation. Le contrôle sera effectué à l'aide des coefficients d'autocorrélation. Ceux-ci montrant une décroissance rapide (Figures 3.47 ; 3.48 ; 3.49 et 3.50). Les séries peuvent donc être estimées comme des processus ARIMA de type $(p, 1, q)$.

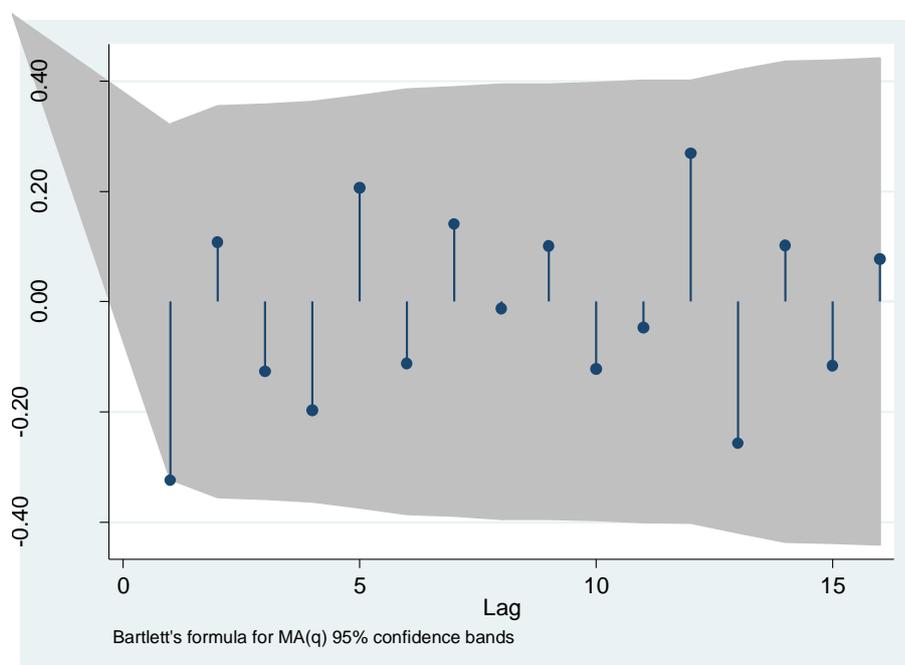


Figure 3.47 : Autocorrélogramme simple des températures de Zenata.

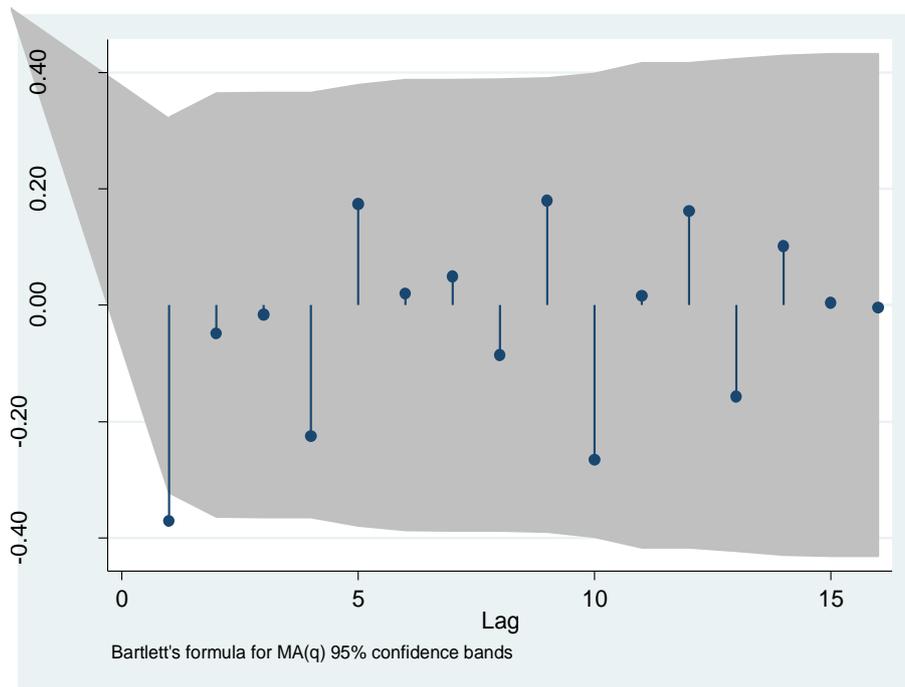


Figure 3.48 : Autocorrélogramme simple des températures de Maghnia.

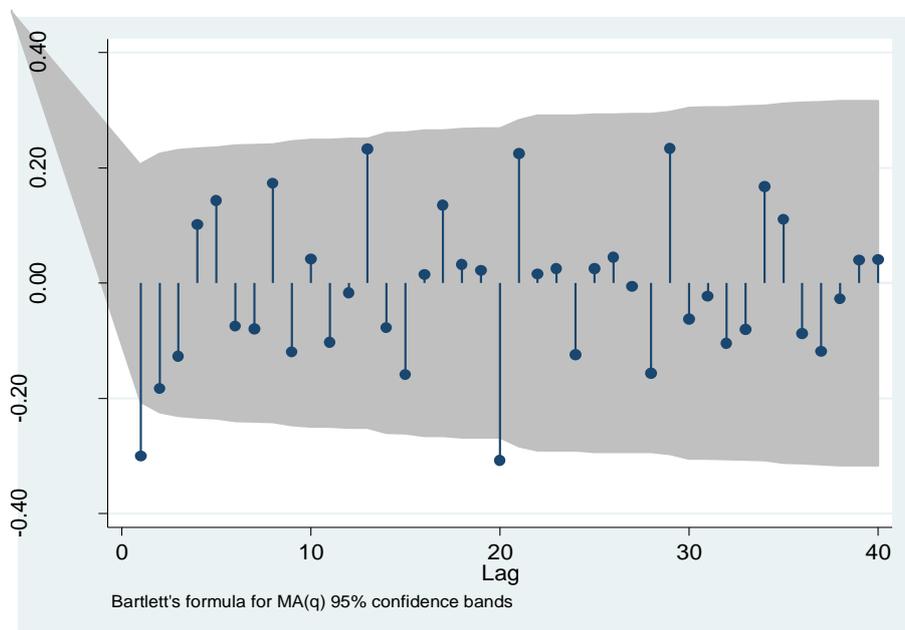


Figure 3.49 : Autocorrélogramme simple des précipitations de Zenata

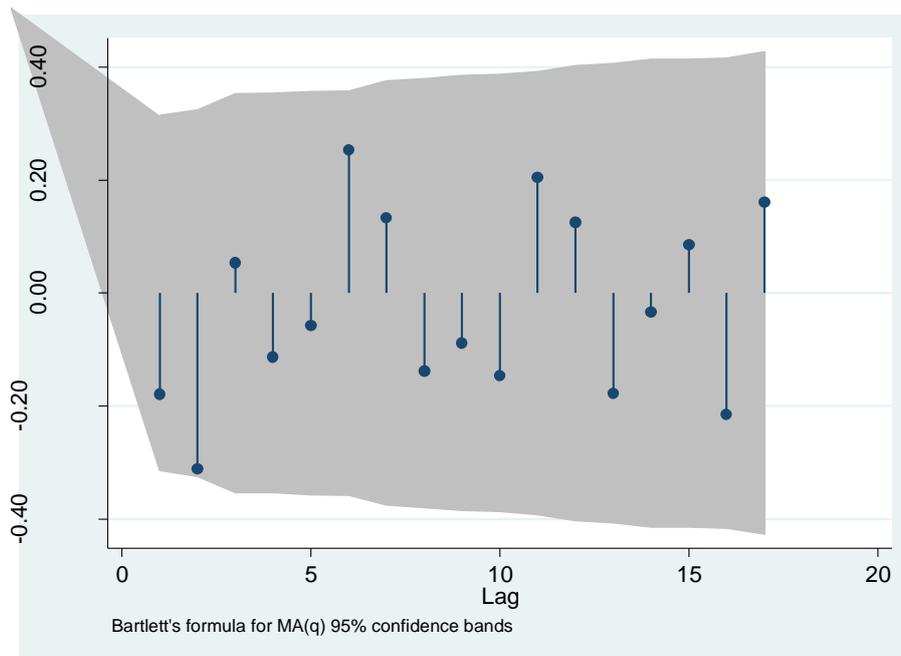


Figure 3.50 : Autocorrélogramme simple des précipitations de Maghnia.

4.6.2. Degré d'intégration des séries des températures et des précipitations

L'examen des coefficients d'autocorrélation simples (les figures précédentes), que ce soit pour les précipitations ou pour les températures et que ce soit pour la station de Zenata ou la station de Maghnia, montre que ceux-ci s'annulent à partir du lag 1 (décalage). Les processus des températures et des précipitations peuvent donc être considérées comme des moyennes mobiles d'ordre 1.

Cependant, l'examen des autocorrélations partielles (Figures 3.51 ; 3.52 ; 3.53 et 3.54) laisse penser que ce ne sont pas des moyennes mobiles pures. En fait, les résultats de plusieurs itérations de type identification-estimation-validation conforte l'hypothèse d'un modèle mixte d'ajustement de type ARIMA (1, 1, 1) tant pour les températures que pour les précipitations des deux stations.

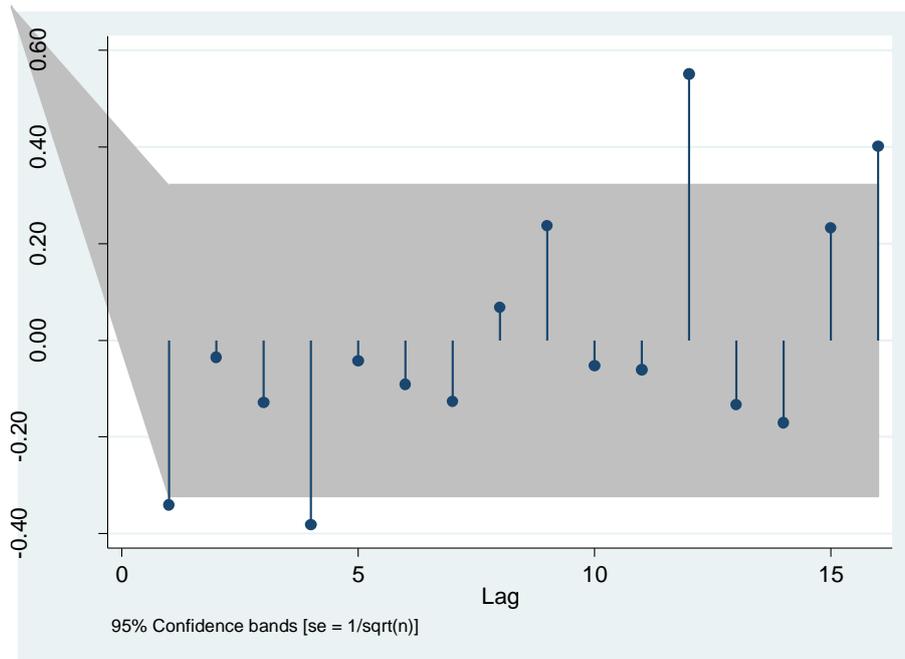


Figure 3.51 : Autocorrélogramme partiel des températures de Zenata.

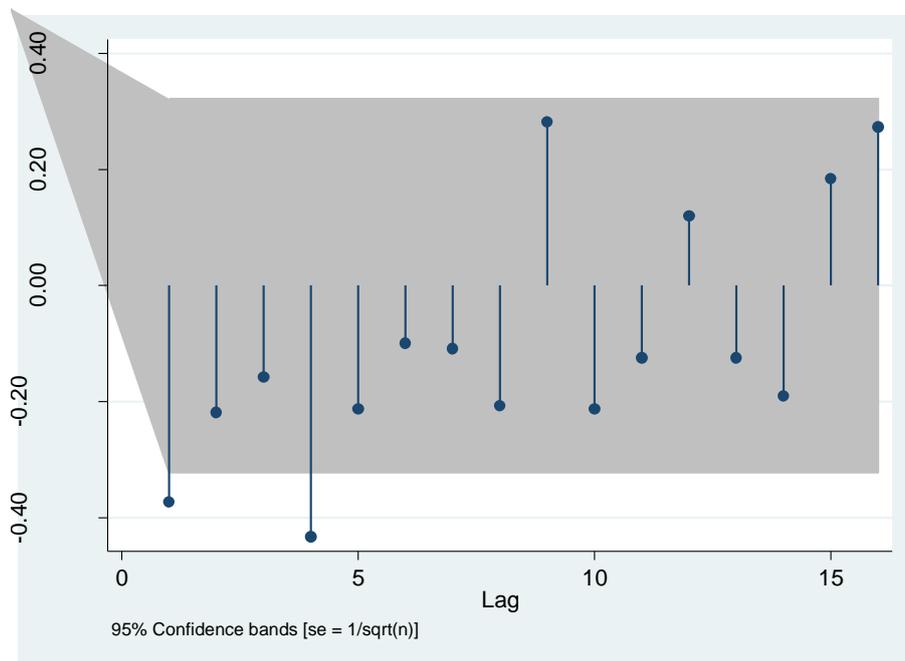


Figure 3.52 : Autocorrélogramme partiel des températures de Maghnia.

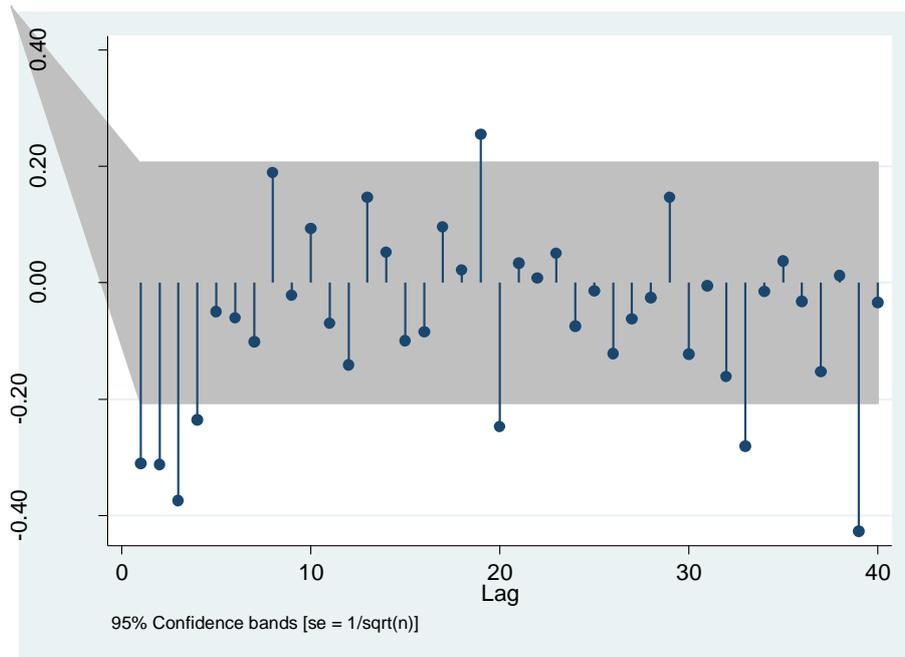


Figure 3.53 : Autocorrélogramme partiel des précipitations de Zenata.

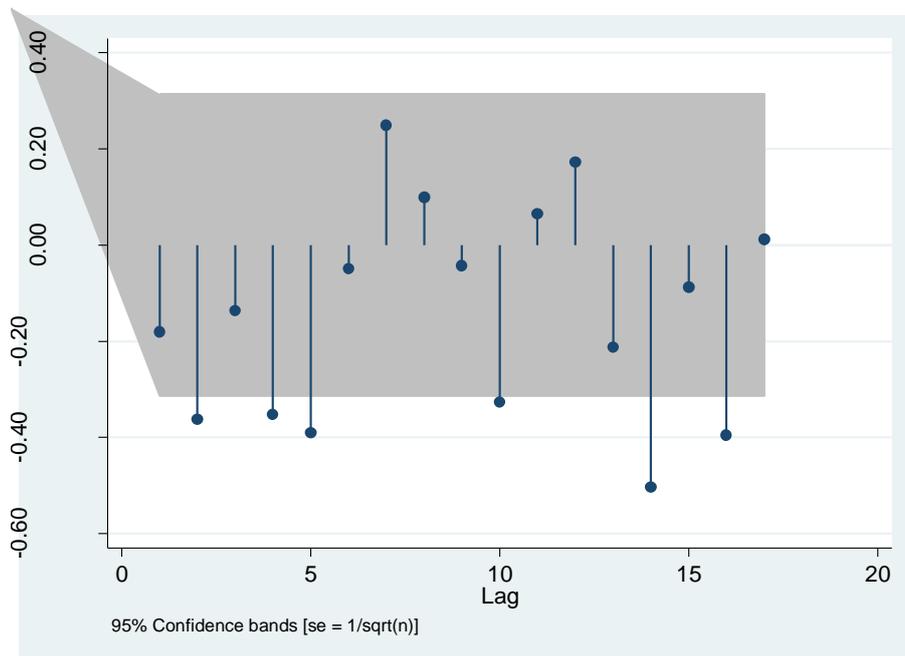


Figure 3.54 : Autocorrélogramme partiel des précipitations de Maghnia.

Le modèle ARIMA (1, 1, 1) adopté, il faut déterminer ses paramètres. Les tableaux suivants résument les résultats obtenus. Les coefficients « moyenne mobile » sont très significatifs. Pour les autres paramètres, ils sont de signification un peu légère.

Tableau 3.6 : Estimation des paramètres des modèles pour les températures.

VARIABLES	Température de la station de Zenata	Température de la station de Maghnia
L.ar	0.275	0.205
	(0.962)	(1.349)
L.ma	-0.786***	-1.000
	(-4.738)	
Constant	0.0504	0.0284***
	(1.510)	(3.170)
Observations	37	37

Tableau 3.7 : Estimation des paramètres des modèles pour les précipitations.

VARIABLES	Température de la station de Zenata	Température de la station de Maghnia
L.ar	0.155	0.346*
	(1.171)	(1.662)
L.ma	-0.780***	-1.000
	(-8.378)	(-0.001)
Constant	-0.180	-0.159
	(-0.521)	(-0.698)
Observations	90	39

4.6.3. Validation du modèle

La dernière étape consiste à s'assurer que les résidus d'estimation sont un bruit blanc. Pour cela, le test d'hypothèse de bruit blanc de Bartlett sera appliqué. La statistique du test doit évoluer entre les limites supérieures et inférieures. Ceci est bien le cas tant pour les températures que pour les précipitations des deux stations comme le montrent les figures ci-dessous.

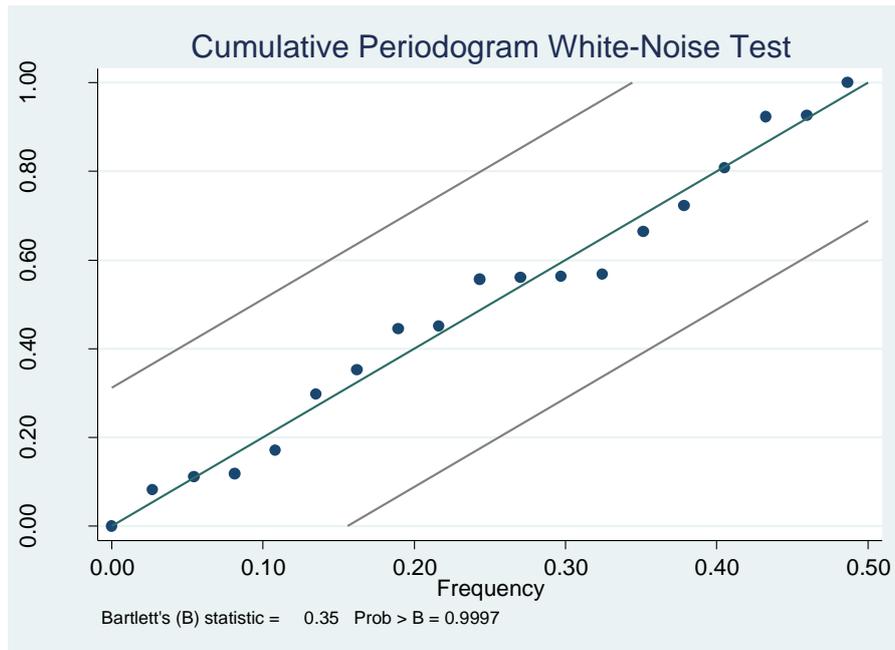


Figure 3.55 : Test de bruit blanc des températures de la station de Zenata.

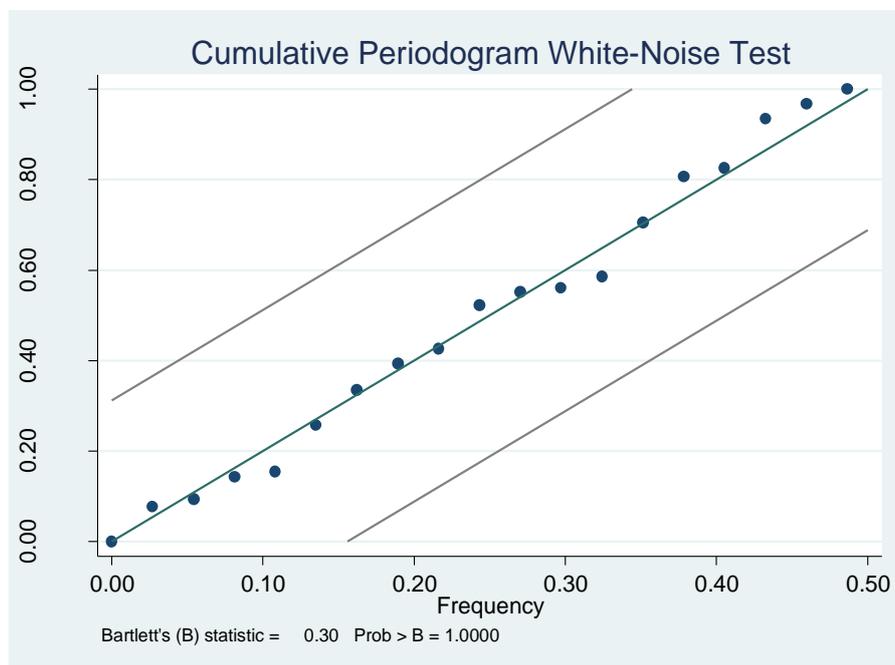


Figure 3.56 : Test de bruit blanc des températures de la station de Maghnia.

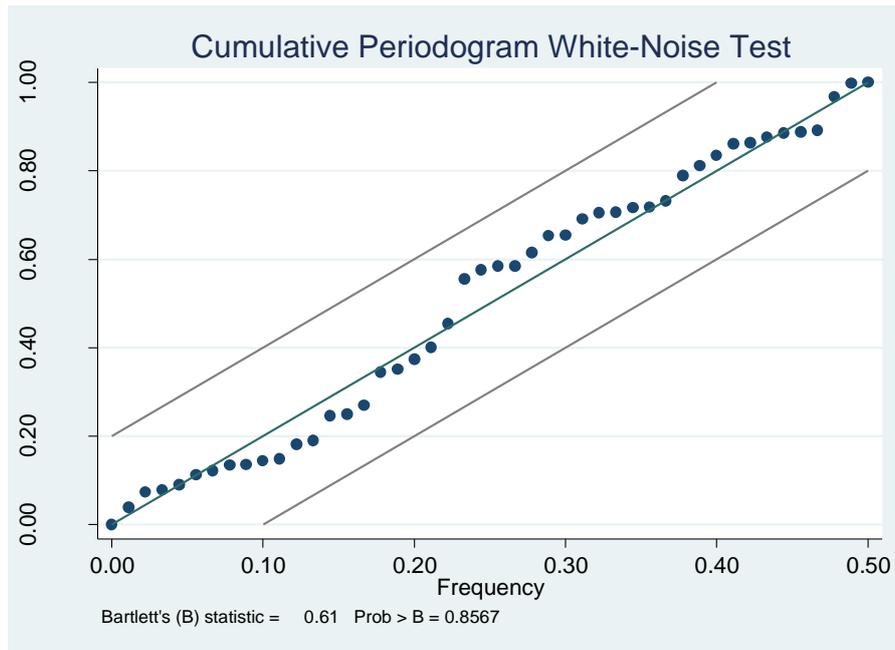


Figure 3.57 : Test de bruit blanc des précipitations de la station de Zenata.

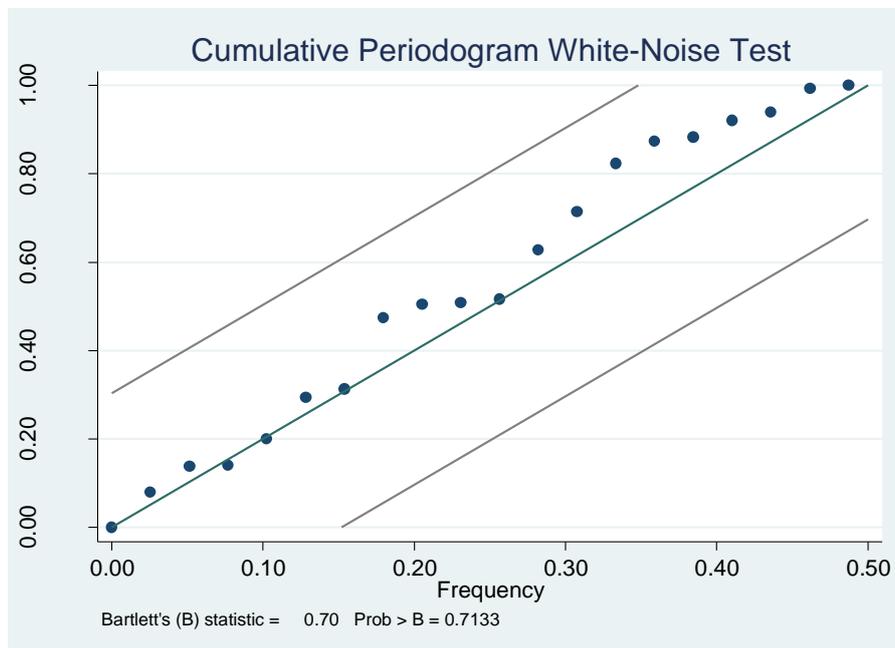


Figure 3.58 : Test de bruit blanc des précipitations de la station de Maghnia.

4.6.4. Prévisions climatiques

Les paramètres étant déterminés et les différents tests appliqués, les projections dans l’avenir peuvent être effectuées. Les résultats sont représentés sur les figures suivantes.

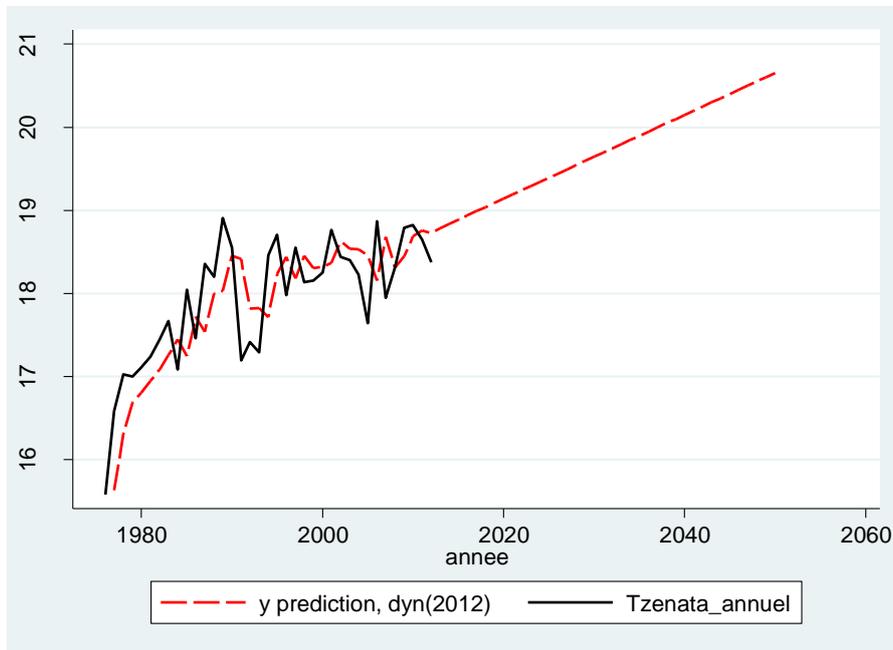


Figure 3.59 : Projection des températures de la station de Zenata.

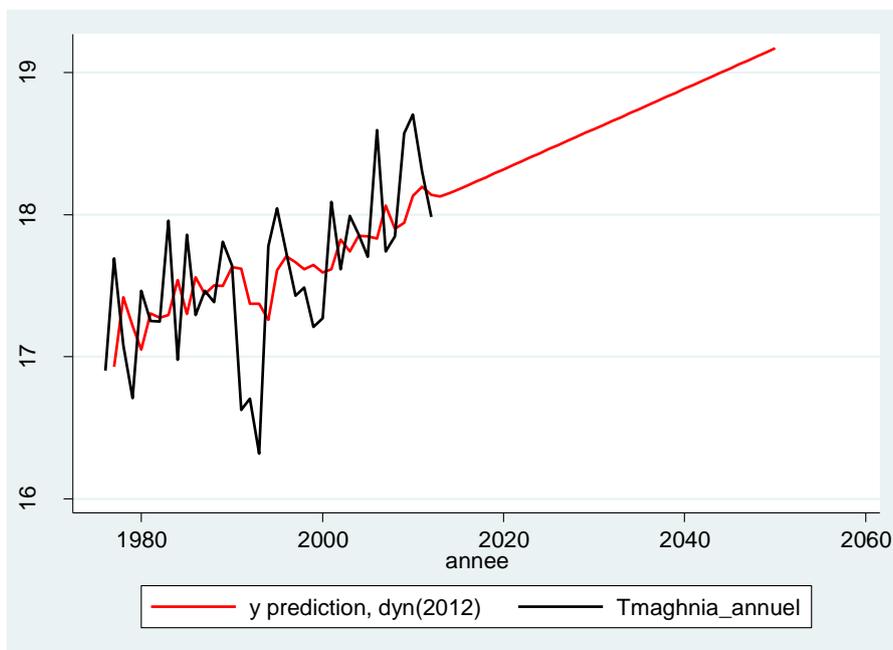


Figure 3.60 : Projection des températures de la station de Maghnia.

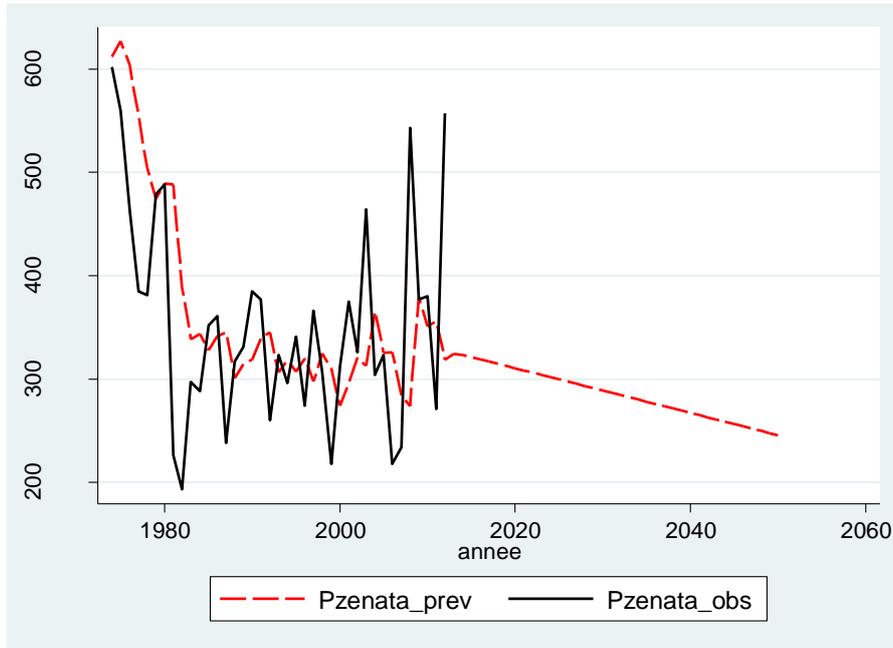


Figure 3.61 : Projection des précipitations de la station de Zenata.

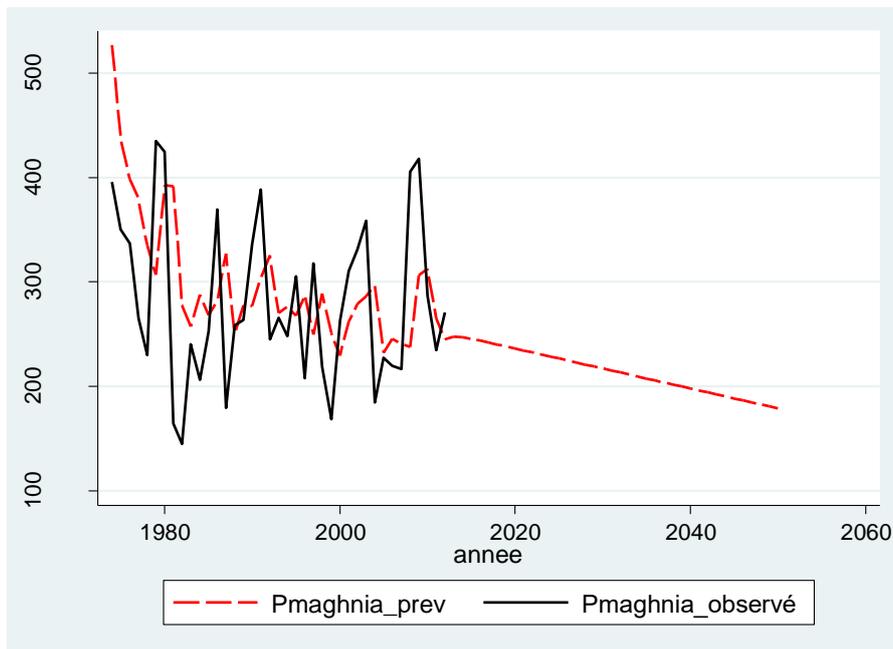


Figure 3.62 : Projection des précipitations de la station de Maghnia.

Comme il est visible sur l'ensemble des figures, les températures ont tendance à augmenter et les précipitations à diminuer. Ces prévisions qui sont effectuées à l'aide d'un modèle ARIMA (1, 1, 1) confirment que la situation actuelle du climat de la région étudiée caractérisée par un déficit des précipitations risque de persister à court et moyen terme.

Les estimations de ces calculs donnent qu'à l'horizon 2050, la température moyenne annuelle de la région de Zenata risque d'augmenter de 2°C alors que celles de la région de Maghnia à 1°C.

Ces mêmes projections prévoient une baisse des précipitations, environ 100 mm en moyenne annuelle pour la région de Zenata et environ 90 mm pour la région de Maghnia.

L'ensemble de ces résultats vont dans le sens où le changement climatique entrainera une hausse des températures et une baisse des précipitations dans les deux régions d'étude.

5. Etude de la persistance de la sécheresse à l'aide des chaînes de Markov

5.1. Introduction

Les phénomènes hydrologiques comme les sécheresses ou les inondations sont des phénomènes qui obéissent aux lois de la nature, c'est-à-dire qu'ils sont aléatoires et imprévisibles. C'est pour cette raison qu'ils sont très souvent appréhendés comme des processus stochastiques. Leurs prévisibilités sont donc généralement approchées à l'aide d'analyse statistique et probabiliste et rarement par des approches déterministes.

Les chaînes de Markov qui sont des processus stochastiques qui définissent la probabilité de l'avènement d'un événement en fonction des événements qui l'ont précédé peuvent être utilisées pour étudier la persistance de la sécheresse dans notre cas.

5.2. Définition et propriétés

Une chaîne de Markov est un processus stochastique à temps discret et des états discrets et qui possède la propriété de Markov qui stipule que toute l'information nécessaire pour prédire l'avenir est contenue dans l'état présent. Le passage s'effectue donc d'un état donné à l'état suivant immédiat et ceci à l'aide d'une matrice dite « matrice de transition ».

Symboliquement, on peut écrire la propriété de Markov par :

$$P(X_{n+1}/X_0, X_1, \dots, X_n) = P(X_{n+1}/X_n)$$

Cette relation exprime le fait que la probabilité relative au pas X_{n+1} sachant tous les états relatifs aux pas X_0, X_1, \dots, X_n est la même si on ne prend en compte que l'état relatif au pas X_n .

On dira de la chaîne de Markov qu'elle est homogène si la matrice de transition ne change pas au cours du temps.

On dira de la chaîne de Markov qu'elle est d'ordre 1 si elle ne prend en compte que l'état actuel pour prédire l'état suivant, elle est d'ordre 2 si elle prend en compte les deux états précédents pour prédire l'évènement suivant, etc.

5.3. Application des chaînes de Markov d'ordre 1

Dans le cas de chaînes de Markov d'ordre 1, l'état du processus au pas du temps $(i+1)$ est déterminé uniquement en fonction de l'état du processus au pas du temps (i) . Comme il s'agira d'étudier la persistance de la sécheresse au pas de temps annuel, il faudra donc définir le seuil à partir duquel une année sera considérée comme sèche ou humide. C'est sur la base de l'analyse fréquentiel que les années seront qualifiées de sèches ou d'humides. Cette méthode est plus pratique dans la mesure où il n'y a pas lieu de définir une loi de probabilité.

Il faut noter que l'adoption de la méthode fréquentielle pour le classement des années sèches et des années humides est un choix plutôt optimiste car automatiquement et pour chaque série, 60% des années seront rangées dans la catégorie humide et 40% des années seront classées dans la catégorie sèche.

Dans ce cas des chaînes de Markov d'ordre 1, quatre situations peuvent se présenter :

- Une année sèche est suivie d'une année sèche (S-S);
- Une année sèche est suivie d'une année humide (S-H) ;
- Une année humide est suivie d'une année sèche (H-S);
- Une année humide est suivie d'une année humide (H-H) ;

Chaque cas est caractérisé par une probabilité d'occurrence. Celle-ci est déterminée sur la base des séries pluviométriques utilisées en déterminant d'abord la matrice des fréquences de transition et qui seront converties en matrice de transition.

Les matrices des fréquences et des probabilités de transition des quatre stations utilisées dans cette thèse sont données dans les tableaux 3.8 et 3.9 ci-après.

Les chiffres des tableaux suivants montrent que pour les stations de Maghnia, de Hammam Bouhrara et de Béni Bahdel, il y'a presque autant de chance qu'une année sèche soit suivie d'une année sèche ou d'une année humide. Par contre, il y'a plus de chance qu'une année humide soit suivie d'une année humide que d'une année sèche.

Par contre, pour la station de Zenata, la différence est très nette. En effet, il y'a une très forte probabilité qu'une année sèche soit suivie d'une année sèche et qu'une année humide soit suivie

d'une année humide. La probabilité qu'il y'ait alternance entre année sèche et année humide est très faible.

Ces résultats confirment que la sécheresse est modérée du côté des stations de Maghnia, Hammam Boughrara et Béni Bahdel alors qu'elle est persistante du côté de la station de Zenata.

Tableau 3.8 : Matrices des fréquences de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 1).

Station de Maghnia				Station de Hammam Boughrara			
	S	H	Total		S	H	Total
S	7	9	16	S	9	8	17
H	9	14	23	H	8	16	24
Total	16	23	39	Total	17	24	41
Station de Béni Bahdel				Station de Zenata			
	S	H	Total		S	H	Total
S	14	15	29	S	28	8	36
H	15	27	42	H	8	46	54
Total	29	42	71	Total	36	54	90

Tableau 3.9 : Matrices des probabilités de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 1).

Station de Maghnia				Station de Hammam Boughrara			
	S	H	Total		S	H	Total
S	0,44	0,56	1	S	0,53	0,47	1
H	0,39	0,61	1	H	0,33	0,67	1
Station de Béni Bahdel				Station de Zenata			
	S	H	Total		S	H	Total
S	0,48	0,52	1	S	0,78	0,22	1
H	0,36	0,64	1	H	0,15	0,85	1

5.4. Application des chaînes de Markov d'ordre 2

Dans le cas des chaînes de Markov d'ordre 2, l'état du processus au pas du temps ($i+1$) est déterminé uniquement en fonction de l'état du processus au pas du temps (i et $i-1$). Cette situation fait que huit combinaisons sont possibles :

- Deux années sèches sont suivies d'une année sèche (SS-S);
- Deux années sèches sont suivies d'une année humide (SS-H);
- Deux années humides sont suivies d'une année humide (HH-H);
- Deux années humides sont suivies d'une année sèche (HH-S);
- Une année sèche et une année humide sont suivies d'une année humide (SH-H);
- Une année sèche et une année humide sont suivies d'une année sèche (SH-S);
- Une année humide et une année sèche sont suivies d'une année humide (HS-H);
- Une année humide et une année sèche sont suivies d'une année sèche (HS-S);

Les matrices des fréquences et des probabilités de transition des quatre stations utilisées dans cette thèse sont données dans les tableaux 3.10 et 3.11 ci-après.

Les résultats des deux tableaux montrent surtout que la station de Zenata se comporte différemment par rapport aux autres stations. En effet, pour les stations de Maghnia, de Hammam Boughrara et de Béni Bahdel, seul le cas d'une année humide qui suit deux autres années humides sort du lot avec un pourcentage entre 21% et 26%. Les autres combinaisons se limitent à des probabilités entre 7% et 16%. Pour la station de Zenata, il y'a 44% de chance à ce que deux années humides soient suivies d'une année humide et 26% de chance à ce que deux années sèches soient suivies d'une année sèche. Les autres combinaisons reçoivent des probabilités très faibles pour qu'elles se produisent.

En comparant les tableaux des probabilités des chaînes de Markov d'ordre 1 et d'ordre 2, il semble que les deux modèles vont dans le même sens quand il s'agit d'une transition entre les années humides. Par contre, quand il s'agit des autres combinaisons, les deux modèles diffèrent dans leurs pronostics, même si ceci est attendu vu qu'il y'a plus de possibilités dans le cas des chaînes de Markov d'ordre 2 que celles d'ordre 1.

Tableau 3.10 : Matrices des fréquences de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 2).

Station de Maghnia					Station de Hammam Bouhrara			
	S	H	Total			S	H	Total
SS	5	3	8		SS	4	5	9
SH	3	5	8		SH	2	6	8
HS	3	5	8		HS	5	3	8
HH	6	8	14		HH	6	9	15
Total	17	21	38			17	23	40
Station de Béni Bahdel					Station de Zenata			
	S	H	Total			S	H	Total
SS	7	7	14		SS	23	5	28
SH	5	9	14		SH	3	5	8
HS	7	8	15		HS	5	3	8
HH	9	18	27		HH	6	40	46
Total	28	42	70			37	53	90

Tableau 3.11 : Matrices des probabilités de transition des quatre stations (Chaines de Markov d'ordre 2).

Station de Maghnia					Station de Hammam Bouhrara			
	S	H	Total			S	H	Total
SS	0,13	0,08	0,21		SS	0,10	0,13	0,23
SH	0,08	0,13	0,21		SH	0,05	0,15	0,20
HS	0,08	0,13	0,21		HS	0,13	0,08	0,20
HH	0,16	0,21	0,37		HH	0,15	0,23	0,38
Station de Béni Bahdel					Station de Zenata			
	S	H	Total			S	H	Total
SS	0,10	0,10	0,20		SS	0,26	0,06	0,31
SH	0,07	0,13	0,20		SH	0,03	0,06	0,09
HS	0,10	0,11	0,21		HS	0,06	0,03	0,09
HH	0,13	0,26	0,39		HH	0,07	0,44	0,51

6. Etude de la régularisation

6.1. Introduction

Pour faire face à la pénurie d'eau à laquelle l'Algérie faisait face après les années soixante-dix, le pays s'est lancé dans un vaste programme de mobilisation de cette ressource y compris celle de surface. C'est dans ce contexte que le barrage Hammam Boughrara a vu le jour.

Les études initiales prévoient un volume régularisable annuellement de 59 Mm³. Ce volume servirait à améliorer l'offre en eau potable des villes d'Oran et de Maghnia qui recevront respectivement 33 Mm³ et 17 Mm³, les 9 Mm³ restant serviront à la mise en valeur des terres agricoles du périmètre irrigué de Maghnia [Rouissat, 2016].

Dans cette partie, il sera montré que ces chiffres sont surestimés.

6.2. Evaluation de la pluie moyenne sur le bassin du barrage Hammam Boughrara

L'étude de la régularisation des barrages peut être effectuée en se basant sur la pluie moyenne qui tombe sur le bassin ou à travers les débits enregistrés sur le principal cours d'eau alimentant le réservoir du barrage. La première méthode est peu fiable car elle nécessite la détermination de la pluie moyenne qui tombe sur le bassin et la connaissance de la part de cette pluie qui revient à l'atmosphère par le phénomène de l'évapotranspiration. La seconde méthode est plus réaliste car elle se base sur les écoulements réels.

Pour évaluer la lame d'eau qui est tombée sur le bassin, c'est la méthode des éléments finis qui a été préférée aux autres méthodes empiriques (méthode de Thiessen ou méthode des deux axes) car elle est indépendante de l'échelle et des différents choix de l'utilisateur.

Pour appliquer cette méthode, il faut quadriller le bassin par un certain nombre de stations pluviométriques. Dans le cas du bassin du barrage Hammam Boughrara, dix stations ont été retenues, huit stations internes au bassin et deux extérieures. Malheureusement, ces stations ne quadrillent le bassin que du côté algérien. Du côté marocain, l'information n'a pas été disponible.

Les stations retenues ainsi que leurs coordonnées et leurs durées de fonctionnements sont données dans le tableau (3.12) suivant.

Tableau 3.12 : Stations pluviométriques retenues pour l'évaluation de la pluie moyenne sur le bassin.

N°	Station	Code	Coordonnées			Période de fonctionnement
			X	Y	Z	
1	Maghnia	160 302	90,65	174,65	395	73/74 – 12/13
2	Béni Ouassine	160 303	90,83	180,7	418	53/54 - 61/62 67/68 - 04/05
3	Béni Boussaid	160 315	92,35	159,6	675	85/86 - 04/05
4	Béni Bahdel	160 403	114,98	164,6	666	39//40 - 10/11
5	Khemis	160 406	109,3	157,1	870	43/44 - 54/55 69/70 - 98/99
6	Sidi Medjahed	160 407	102,8	173,1	360	67/68 - 98/99
7	Hammam Boughrara	160 501	103,7	185,8	270	69/70 - 10/11
8	Sabra	160 502	115,1	178,75	620	70/71 - 98/99
9	Sidi Boudjenane	40 103	77,4	192,9	425	52/53 - 62/63 68/69 - 98/99
10	Sidi Djilali	80 101	154,7	35,5	1410	69/70 - 69/70 72/73 - 98/99

Ces stations possèdent des séries de pluies qui ne s'étalent pas sur la même durée. En plus, certaines stations possèdent des lacunes. C'est pourquoi, il a été nécessaire d'examiner leurs homogénéités. C'est la station Béni Bahdel qui s'est avérée homogène et c'est elle qui va servir pour homogénéiser les autres séries et les étaler dans le temps. C'est pour cette raison aussi que la détermination de la pluie moyenne et l'étude de la régularisation s'arrêteront en 2010/2011.

Il faut préciser que c'est le test de Wilcoxon qui a été utilisé pour tester l'homogénéité des séries, la méthode du double cumul (double masse) pour corriger les hétérogénéités et que c'est la méthode de corrélation qui a servi pour combler les lacunes ou étaler les séries dans le temps.

Ces calculs étant de base, ils ne sont pas repris dans cette thèse. Il faut juste rappeler que le taux de l'évaporation a été pris égal à 4% selon les résultats de la formule de Tixeront-Berkaloff. Cette formule donne le taux le plus raisonnable en comparaison des chiffres réellement enregistrés au niveau du barrage.

Les volumes mobilisables sont directement représentés sur la figure 3.63 qui donne l'ajustement de ces volumes selon la distribution normale. Il faut rappeler que le test Khi-2 accepte l'hypothèse selon laquelle ces volumes s'ajustent à une distribution normale.

Le volume régularisable est défini comme étant le volume qu'on peut atteindre ou dépasser huit années sur dix si cette ressource est destinée à l'agriculture. Cette probabilité devient neuf années sur dix si l'eau est destinée à l'alimentation en eau potable.

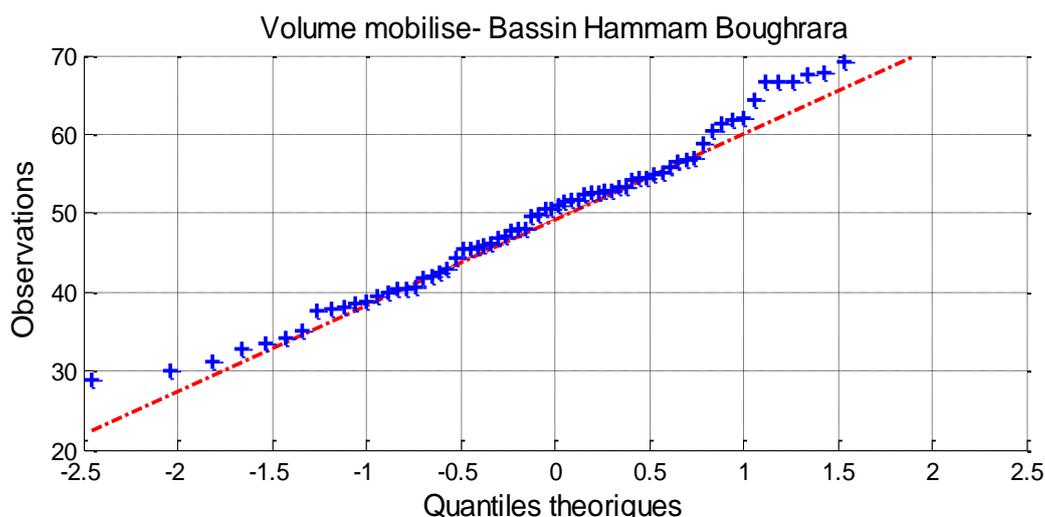


Figure 3.63 : Ajustement des volumes mobilisables selon la distribution normale.

En se basant sur la droite de Henry, les volumes régularisables calculés à partir de la pluie moyenne évaluée sur le bassin varient entre 35 Mm³ et 39 Mm³ selon la destination des ressources mobilisées. En se basant sur la série des débits, ces volumes passeront à 24 Mm³ et 31 Mm³. Ces volumes restent suffisamment éloignés des 59 Mm³ prévus par l'étude.

Ce qui conforte cette idée, c'est que la moyenne des apports enregistrés au niveau du barrage Hammam Boughrara entre 2000/2001 et 2011/2012 est de 44,9 Mm³ avec un minimum de 15,4 Mm³ lors de l'année 2004/2005 et un maximum lors d'une année exceptionnelle 2008/2009 de 145 Mm³. En supprimant ce dernier chiffre, la moyenne descend à 35,3 Mm³. En même temps et durant cette même période, les volumes du barrage réellement exploités varient entre un minimum de 5,6 Mm³ lors de l'année 2011/2012, un maximum de 49,1 Mm³ lors de l'année 2001/2002 et une moyenne de 23 Mm³. Ce qui ressort de ce point, c'est que le chiffre de 59 Mm³ n'a jamais été atteint.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, ce sont les méthodes qui servent à caractériser les sécheresses pluviométriques qui ont été listées puis appliquées aux séries qui servent à illustrer le présent travail, le but étant surtout de les comparer. Il s'avère que globalement toutes les méthodes, que ça soit celles qui se basent sur les indices et qui donnent des indications localisées dans le temps, celle qui donne des indications sur la tendance ou les celles qui se basent sur les analyses statistiques et qui permettent de détecter le changement et la rupture dans les séries, donnent des résultats très semblables. Les périodes sèches sont sensiblement les mêmes de même que les périodes humides. Les ruptures dans les séries sont parfois indiquées à des dates différentes mais très proches.

Un problème s'est posé pour les tests exigeant une distribution normale des séries. En effet, pour certaines séries, le test Khi-2 accepte l'hypothèse nulle, c'est-à-dire une distribution normale de la série alors que le test de Kolmogorov-Smirnov la rejette. Certains tests n'ont pas pu être appliqués.

En fin de cette partie et à l'aide de l'indice SPI mensuel, il a été conclu que la région subissait dans le passé l'effet du changement climatique avec un enregistrement de pic moins nombreux mais élevés quand il s'agit de pluie excédentaire. Au niveau des déficits, ils sont plus nombreux mais moins extrêmes. Ces mêmes résultats ont été publiés dans [Adjim et Djedid, 2018].

Le modèle ARIMA confirme que cet effet a beaucoup de chance de se prolonger dans le temps avec une diminution des moyennes des précipitations et des températures. Les chaînes de Markov d'ordre 1 et d'ordre 2 montrent que pour les stations de Maghnia, de Hammam Boughrara et de Béni Bahdel, il y'a autant de chance de voir une année sèche suivie d'une année humide. Par contre, pour la station de Zenata, la différence est nette. La probabilité de voir deux années sèches ou deux années humides se suivent est très importante par rapport à une alternance entre année sèche et année humide. L'étude de la régularisation montre que les volumes régularisables prévus par l'étude sont un peu surestimés et qu'un ajustement serait souhaitable.

Chapitre 4

Approche par ondelettes de la variabilité climatique

1. Introduction

Les ondelettes sont des outils mathématiques qui ont vu le jour pour répondre au besoin d'une analyse en fréquence et en temps. Elles sont vite devenues un fort outil pour analyser les variations localisées de la puissance des séries chronologiques.

La transformation en ondelettes décompose une série temporelle en un espace « temps-fréquence », permettant de déterminer à la fois les modes dominants de la variabilité et la façon dont ces modes varient dans le temps.

La transformée en ondelette a été introduite dans le langage mathématique par Jean Morlet et Alex Gossman, pour l'analyse des signaux sismiques [Grossman et Morlet, 1984], alors que la première ondelette, l'ondelette de Haar, a été définie en 1909 par Alfred Haar, la deuxième en 1946 par Dennis Gabor.

En 1986 furent définies les ondelettes orthogonales par Yves Meyer [Meyer.Y et al, 1987]. L'ondelette de Daubechies a vu le jour et en 1987 [Daubechies, 1992] et c'est Stephane Mallat, qui en 1986, a établi le lien entre les ondelettes et l'analyse multi-résolution [Mallat, 1989].

Depuis, les ondelettes ne cessent de fasciner les chercheurs par la diversité de leurs potentialités. Initialement utilisées dans le traitement du signal [Truchelet, 1998], ces transformées sont vite devenues un outil indispensable dans le traitement des images particulièrement dans l'imagerie médicale [Damerval, 2008]. A cause des possibilités qu'elles offrent, d'autres domaines et disciplines se sont intéressés aux ondelettes : en géophysique, [Gaillot. P, 2000 ; Rossat, 2004; Truche, 2010; Pasquet, 2014], en hydraulique [Farge, 1992; Anctil et Pelletier, 2011], en hydrologie [Labat, 2000; Chadid, 2003; Guimaraes, 2005; Cannas et all., 2005; Fatmi, 2009; Yruska. et all., 2010; Dorval, 2011; Rossi, 2010; Sang, 2013; Chevalier et all., 2014; Wang et all., 2015]. Des travaux sur l'analyse des fluctuations climatiques ont aussi été publiés [Bogdan, 2010 ; Dieppois et all., 2010 ; Santos et all., 2012; Nalley et all., 2012; Partal, 2012 ; Sleziak et all., 2015]. Sur la prévision hydrologique et climatique, les ondelettes ont été associées aux réseaux de neurones [Chettih et Mesbah, 2008 ; Ventaka et all., 2013].

2. Les transformées mathématiques

2.1. Généralités

Les phénomènes physiques qui dépendent du temps peuvent être considérés comme des signaux. Ces signaux sont dans la plupart des cas difficiles à interpréter du fait qu'ils ne sont pas toujours linéaires ou stationnaires. Pour l'étude de ces phénomènes dans le temps, on cherche une interprétation de l'évolution de leurs caractéristiques d'un point de vue répartition spatiale, apparition temporelle et fréquentielle.

Les phénomènes hydrologiques et climatiques sont mesurés par la variabilité dans le temps des précipitations, températures et débits. Ils sont donc des signaux temporels non stationnaires qui peuvent être traités au même titre que ces derniers.

Les signaux climatiques et hydrologiques sont dans la majorité du temps représentés dans le domaine temporel, c'est-à-dire en temps-amplitude. Cette représentation ne montre pas forcément toutes les informations contenues dans ces signaux. En effet, des informations pertinentes peuvent être contenues dans la composante fréquentielle du signal.

Pour extraire les informations contenues dans le domaine fréquentiel, il est pratique d'effectuer une représentation dans le domaine fréquentiel (fréquence-amplitude). Ceci est possible grâce aux transformations mathématiques.

Parmi les transformations mathématiques, les transformées de Fourier sont les plus utilisées pour la décomposition du signal et sa reconstitution sans perte d'information. Cette transformée donne à partir d'une représentation dans le domaine temporel « temps-amplitude », une représentation fréquentielle « fréquence-amplitude ».

Se basant dans sa formulation sur les fonctions sinusoïdales, la transformée de Fourier permet de connaître les fréquences contenues dans le signal sans connaître leurs localisations dans le temps. C'est pourquoi, elle est inadaptée pour étudier les signaux non stationnaires dont la fréquence varie avec le temps.

Comme alternative, la transformée en ondelette, semble être actuellement la plus adaptée pour analyser ces signaux non stationnaires. Elle renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation temporelle, donnant ainsi la meilleure résolution dans le domaine « temps-fréquence » par rapport aux autres transformées. Dans ce qui suit un aperçu sur ces transformées est donné.

2.2. Transformées de Fourier

L'analyse de Fourier propose une approche globale du signal. Elle est définie de moins l'infini à plus l'infini. Toute localisation temporelle pour les signaux et spatiale pour les images disparaît dans l'espace de Fourier. La représentation temps-fréquence à partir d'une représentation temps-amplitude est obtenue par la transformée suivante :

$$Tf(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt$$

$f(t)$ étant le signal et ω la fréquence

2.3. Transformées de Fourier à fenêtre glissante

La transformée de Fourier à fenêtre glissante découverte par Dennis Gabor en 1940, fut la première forme de présentation du signal en temps-fréquence. Elle a été conçue pour limiter le domaine d'intégration (temporel ou spatial) de Fourier par une fenêtre glissante qui permettrait d'explorer le signal plus en détail. La transformée de Gabor décompose le signal en fréquences, intervalle par intervalle. Ceci revient à comparer un segment de signal à des morceaux de courbes oscillantes de différentes fréquences. La formulation mathématique de cette transformée est :

$$Tf_{Gab}(t, \omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) \cdot e^{-\frac{(s-t)^2}{2}} \cdot e^{-j\omega s} \cdot ds$$

Elle est cependant inefficace dans la localisation temps-fréquence (Figure 4.1).

2.4. Transformées en ondelettes

Les ondelettes permettent une analyse qui maintient la localisation temporelle et fréquentielle en décomposant ou en transformant une série temporelle unidimensionnelle en une image temps-fréquence diffuse bidimensionnelle simultanément [Santos et Freire, 2012], à partir de laquelle, il devient possible d'obtenir les propriétés du signal en temps et en fréquence. La transformée en ondelettes s'écrit :

$$Tf_{Ond}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt$$

a et b sont respectivement le facteur d'échelle et le paramètre de translation.

ψ est la fonction d'ondelette.

2.5. Pavage du plan dans les transformées de Gabor et de Fourier

2.5.1. Pavage du plan temps-fréquence par la transformée de Gabor

Dans la transformée de Gabor, la résolution dans le plan temps-fréquence est estimée par la variance de la fonction analysante qui donne un pavage régulier dans lequel les deux résolutions temporelles σ_t et fréquentielles σ_ω sont indépendantes l'une de l'autre et variant dans le même sens, ce qui conduit à une utilisation non rationnelle de l'espace. C'est donc pour cette raison que cette analyse est loin d'être idéale dans l'analyse des signaux non stationnaires.

$$\sigma_x^p = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 |\psi(x)|^2 . dx$$

La figure 4.1 ci-dessous illustre ce pavage.

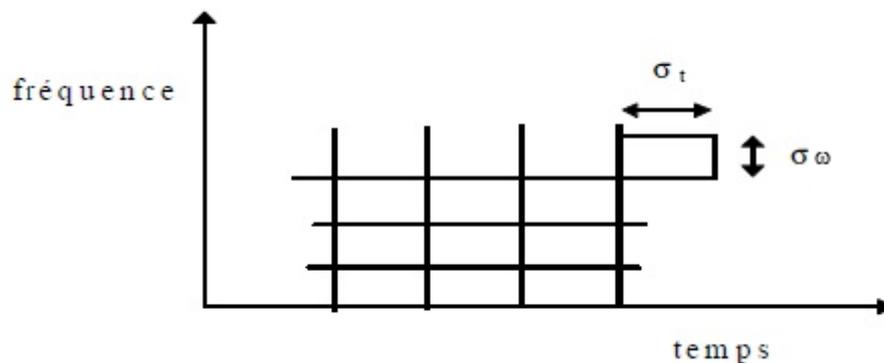


Figure 4.1 : Pavage temps-fréquence pour la transformée à fenêtre glissante.

2.5.2. Pavage du plan temps-fréquence par la transformée en ondelettes

Les ondelettes réalisent un pavage du plan temps-fréquence dans lequel la durée et la bande dépendent de l'échelle, le pavé élémentaire a une surface constante tandis que la résolution temporelle est proportionnelle au facteur « a » et la résolution fréquentielle lui est inversement proportionnelle (Figure 4.2).

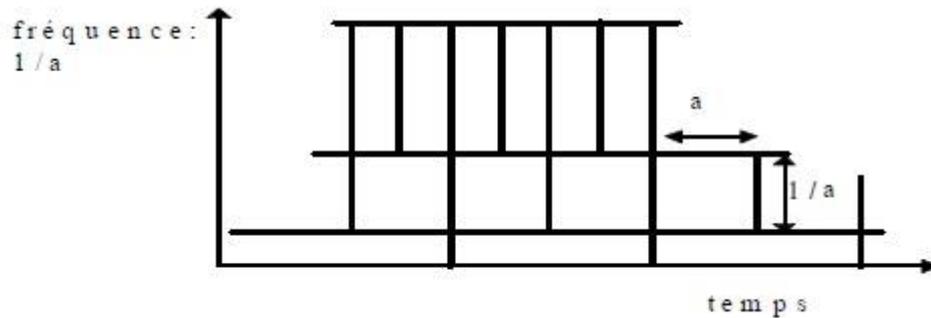


Figure 4.2 : Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelettes.

La largeur s'élargit à grande échelle (basse fréquence) et diminue en diminuant l'échelle (haute fréquence). On peut dire des ondelettes qu'elles ont la fonction de « microscope mathématique » dont le grossissement est donné par $1/a$ et dont l'optique est donné par le choix de la fonction mère [Meyer et al., 1987]. La variation des deux résolutions s'effectue en sens inverse tout en conservant un produit constant du pavage « temps-fréquence », assurant son utilisation rationnelle.

Le facteur d'échelle « a » est l'inverse de la fréquence. Plus « a » est petit, moins l'ondelette (fonction analysante) est étendue temporellement. Inversement, la fréquence centrale de son spectre est élevée.

Finalement, le choix d'une valeur de $a > 1$ provoque la dilatation de la fonction $\psi_{a,b}$ et inversement, le choix de $a < 1$ provoque sa contraction. Lorsque « a » croît, l'ondelette couvre une plus grande fraction du signal [Gaillot, 2000] permettant ainsi d'extraire le comportement à long terme de du signal. Au contraire, plus « a » diminue, moins l'ondelette est étendue temporellement, c'est-à-dire que la fraction du signal analysé diminue permettant l'étude des variations locales à hautes fréquences.

Le changement de la valeur du paramètre « b » permet l'analyse de la fonction au voisinage des différents points b (analyses locales).

$Tf_{ond}(a,b)$ est la projection du signal $f(t)$ sur une famille de fonctions analysantes (ondelettes) $\psi_{a,b}$. Cette famille d'ondelette $\psi_{a,b}(t)$, $a > 0$, $b \in \mathbb{R}$, est définie selon l'équation suivante :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

La figure 4.3 donnée ci-après illustre la différence entre la transformée de Fourier à fenêtre et la transformée en ondelette. Dans la figure (a), la transformée de Fourier à fenêtre conserve une

résolution d'analyse fixe quelque soit la fréquence. Dans la transformée en ondelette (figure b), la résolution diffère entre les basses et hautes fréquences, ce qui fait que cette méthode est mieux adaptée pour l'étude des signaux à fréquences variables.

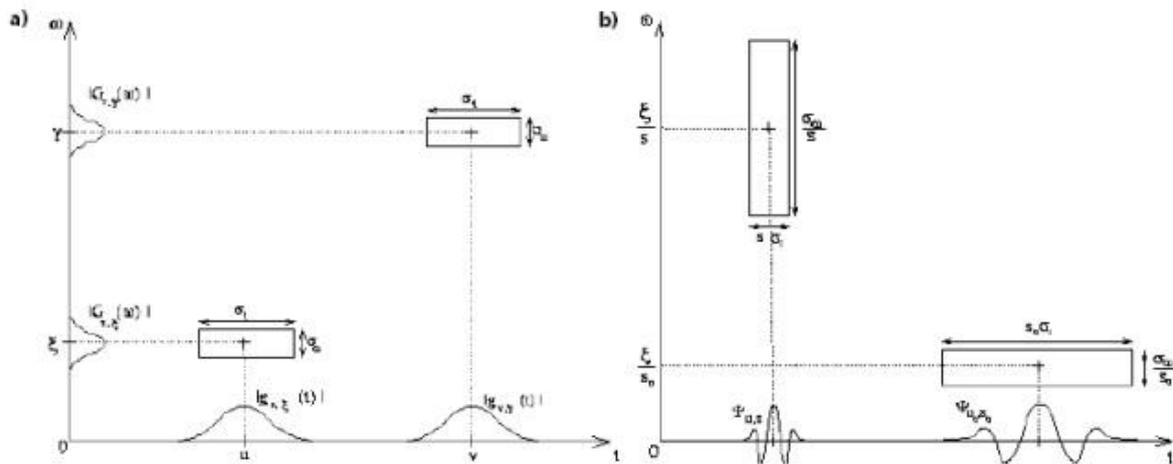


Figure 4.3 : Comparaison entre la transformée de Gabor (a) et la transformée en ondelettes (b) [Diou, 2000 cité par Truche, 2010].

2.6. Ondelette de référence et ses propriétés

2.6.1. Généralités

L'ondelette mère doit vérifier :

- La continuité : Pour être continue, la fonction analysante doit être intégrable et de carré intégrable (énergie finie).
- L'analyticité : La transformée de Fourier de l'ondelette mère doit être nulle pour $\omega < 0$.
- L'admissibilité : Pour être "admissible" en tant qu'ondelette, la fonction doit avoir une moyenne nulle et être localis e à la fois dans l'espace « temps » et dans l'espace « fréquence » [Farge, 1992]. C'est l'admissibilité qui conduit à un comportement passe-bande. Si ψ est intégrable, la première condition implique que le moment d'ordre 0 de l'ondelette s'annule :

$$\int_R \psi(t) \cdot dt = 0 \quad \text{ou} \quad \hat{\psi}(\omega) = 0$$

La condition d'admissibilité établit aussi que :

- La transformée de Fourier $\hat{\psi}(\omega)$ décroît suffisamment au voisinage de 0 ;
- La transformée de Fourier $\hat{\psi}(\omega)$ peut être interprétée comme un filtre passe-bande et la transformée en ondelette comme une convolution avec ce filtre ;
- De plus $\psi(t)$ oscille d'où le nom d'ondelette.

Quand l'ondelette mère vérifie les conditions citées ci-dessus d'admissibilité et de continuité, alors il y'a conservation d'énergie, c'est-à-dire que l'information contenue dans le signal est conservée dans le passage de la fonction f à ses coefficients d'ondelettes. Ce qui est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{1}{C_\psi} \iint |WT_{f,\psi}(a,b)|^2 \frac{da \cdot db}{a^2} = \int |f(x)|^2 dt$$

La deuxième propriété aussi importante que la première est l'invariance de la transformée par dilatation et translation, ceci revient à dire que si $WT_{f,\psi}(a,b)$ est la transformée en ondelettes de $f(x)$, alors $WT_{f,\psi}(a,b-x_0)$ est la transformée de $f(x-x_0)$ et $WT_{f,\psi}(a/\lambda,b/\lambda)$ est la transformée de $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}f(x/\lambda)$. Il faut préciser que cette propriété n'est pas valable dans le cas de la transformée discrète.

La troisième propriété concerne la localisation temps-échelle des ondelettes. La localisation des ondelettes dans le temps et dans les fréquences permet de représenter la zone d'influence dans le demi plan temps-échelle $(R \times R)$ d'un événement se produisant à l'instant x pour le signal f .

Quand l'ondelette $\psi(x)$ est centrée en \bar{x} et que sa transformée de Fourier $\hat{\psi}(\omega)$ en $\bar{\omega}$ et que leurs variances respectives Δ_x^2 et Δ_ω^2 sont finies, alors \bar{x} et Δ_x^2 sont donnés par :

$$\bar{x} = \frac{1}{\|\psi\|^2} \int x |\psi(x)|^2 dx$$

$$\Delta_x^2 = \frac{1}{\|\psi\|^2} \int (x-\bar{x}) |\psi(x)|^2 dx$$

$\bar{\omega}$ et Δ_ω^2 sont définis par des équations similaires.

En se reportant à la définition de la transformée en ondelettes, une analyse est réalisée en temps (x) dans l'intervalle $|b+a\bar{x}-a\Delta_x, b+a\bar{x}+a\Delta_x|$ et en fréquences ($\omega = 2\pi\xi$) dans l'intervalle $|(\bar{\omega}-\Delta_\omega)/a, (\bar{\omega}+\Delta_\omega)/a|$. Ces deux intervalles délimitent une fenêtre temps-fréquence déterminée par les facteurs « a » et « b » avec une aire constante.

2.6.2. Transformées en ondelette continue et en ondelette discrète

Les transformées en ondelettes sont classées selon la famille à laquelle appartiennent les fonctions analysantes choisies. Elles peuvent être continues ou discrètes, la première fonctionne sur toutes les valeurs continues de la fréquence et du temps, la deuxième sur des sous-ensembles particuliers.

- **Les transformées en ondelettes continues**

Les transformées continues sont obtenues en prenant le facteur d'échelle « a » et le pas de translation « b » dans l'ensemble des nombres réels. Ces transformées sont redondantes car l'espace « temps-fréquence » est parcourue de façon continu. Ce type de transformation ne peut dans la pratique être effectué que de façon approximative [Truchetet, 1998] et il y a toujours une discrétisation qui est opérée.

- **Les transformées en ondelettes discrètes**

La transformée en ondelette discrète permet de traiter le problème d'échantillonnage de l'espace « temps-fréquence » avec plus de précision et de mesurer la redondance obtenue dans la transformation. Les résultats des calculs sont généralement exacts sur des intervalles précis dans l'espace « temps-fréquence ». C'est d'ailleurs la raison pour laquelle elles sont utilisées dans le traitement d'image.

2.6.3. Transformée orthogonales et non-orthogonales

Dans la pratique courante, on parle de fonction d'ondelette pour faire référence aux ondelettes orthogonales et non orthogonales. Dans une analyse par ondelettes orthogonales, le nombre de convolution à chaque échelle est proportionnel à la largeur de la base de l'ondelette à cette échelle. Ceci produit un spectre d'ondelettes qui contient des « blocs » discrets de puissance d'ondelettes utiles pour le traitement du signal car il donne la représentation la plus compacte du signal. La transformée non orthogonale est utilisée pour l'analyse des séries temporelles où des variations continues et lisses de l'amplitude de l'ondelette sont attendues.

Parmi les ondelettes non orthogonales on cite l'ondelette de Morlet, l'ondelette de Paul et le chapeau mexicain. Les ondelettes orthogonales les plus connues sont l'ondelette de Haar et l'ondelette de Daubechies (Fig 4.4).

2.6.4. Fonction d'ondelette réelle et fonction complexe

Une fonction d'ondelette complexe renvoi des informations sur l'amplitude et la phase et est mieux adoptée pour capturer le phénomène oscillatoire. Une fonction d'ondelette réelle ne renvoi qu'un seul composant et peut être utilisée pour isoler les pics ou les discontinuités.

Les ondelettes de Morlet et de Paul sont complexes, tandis que le chapeau mexicain est réel. L'ondelette de Morlet contient plus d'oscillations que les autres ondelettes. Des images de ces ondelettes sont montrées sur la Figure 4.4. Le chapeau mexicain ayant une valeur réelle, il capture à la fois les oscillations positives et négatives de la série temporelle. Ceci se traduit dans le tracé du spectre de puissance, par des pics distincts et fins, l'ondelette de Morlet étant complexe, elle combine les pics positifs et les négatifs en un seul pic large [Torrence et Compo, 1998].

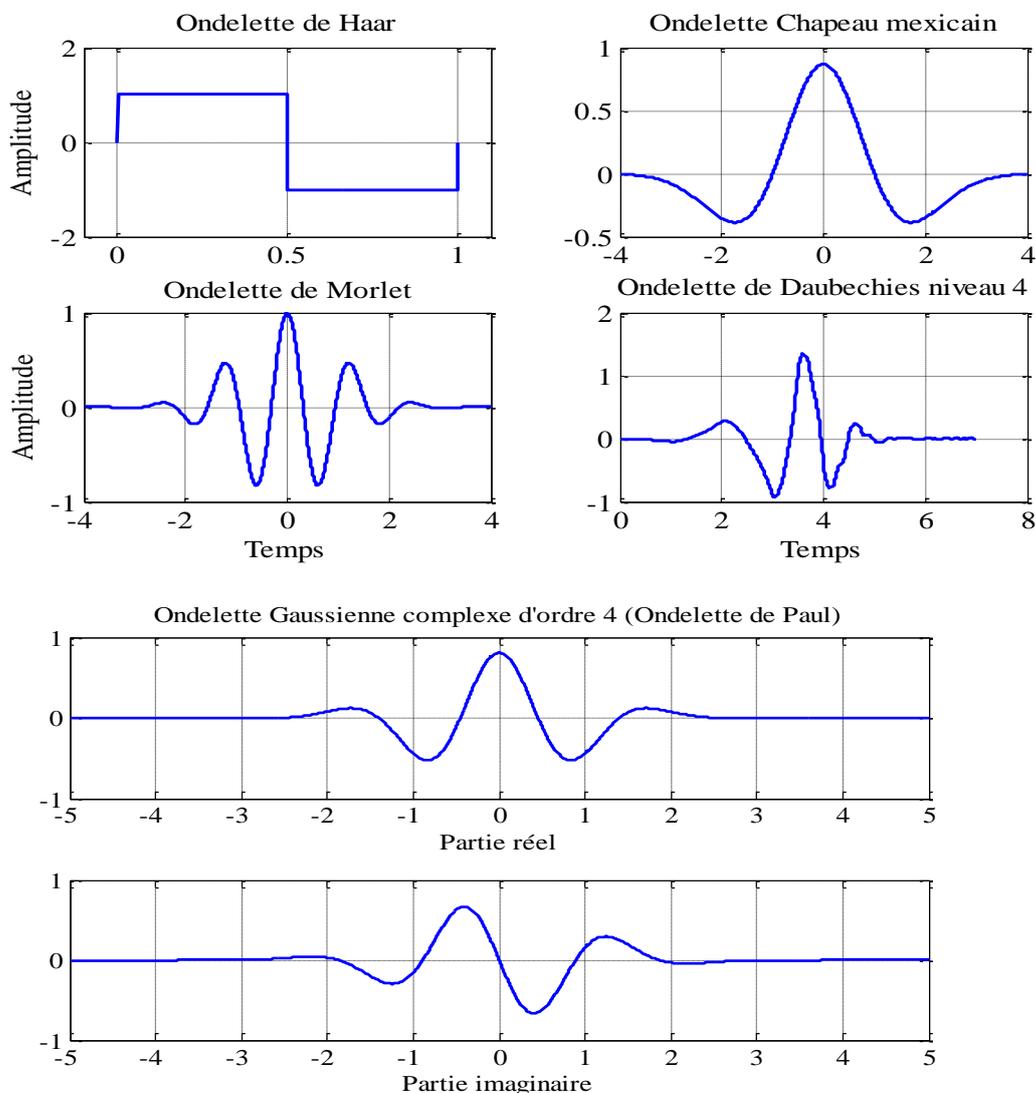


Figure 4.4 : Quelques bases d'ondelettes.

Le tracé du spectre de puissance de la partie réelle ou imaginaire des ondelettes complexes (l'ondelette de Morlet et ondelette de Paul) produit des tracés similaires, les mêmes caractéristiques apparaissent dans les deux tracés, approximativement aux mêmes endroits et avec la même puissance.

2.6.5. Les coefficients d'ondelettes

Les coefficients $C_{a,b}$ que l'on affecte à chaque fonction élémentaire $\psi_{a,b}$ pour décomposer un signal quelconque donnent une information directe sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal. Ces coefficients se calculent en effectuant la somme en continu du produit du signal $f(t)$ par la fonction $\psi_{a,b}$ [Meyer et al., 1987] :

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt$$

Les coefficients dépendent des valeurs du signal. Pour calculer la valeur de ces coefficients, il faut d'abord choisir l'ondelette analysante caractérisée par une fréquence $1/a$ et la centrée sur la valeur b du temps. La multiplication de cette ondelette par le signal $f(t)$ donne un signal $p(t)$. Le calcul de l'aire de ce signal est le coefficient d'ondelette $C_{a,b}$ correspondant à chaque valeur de la fréquence $1/a$ et du temps b . Ces étapes sont schématiquement expliqués sur la figure 4.5 ci-après.

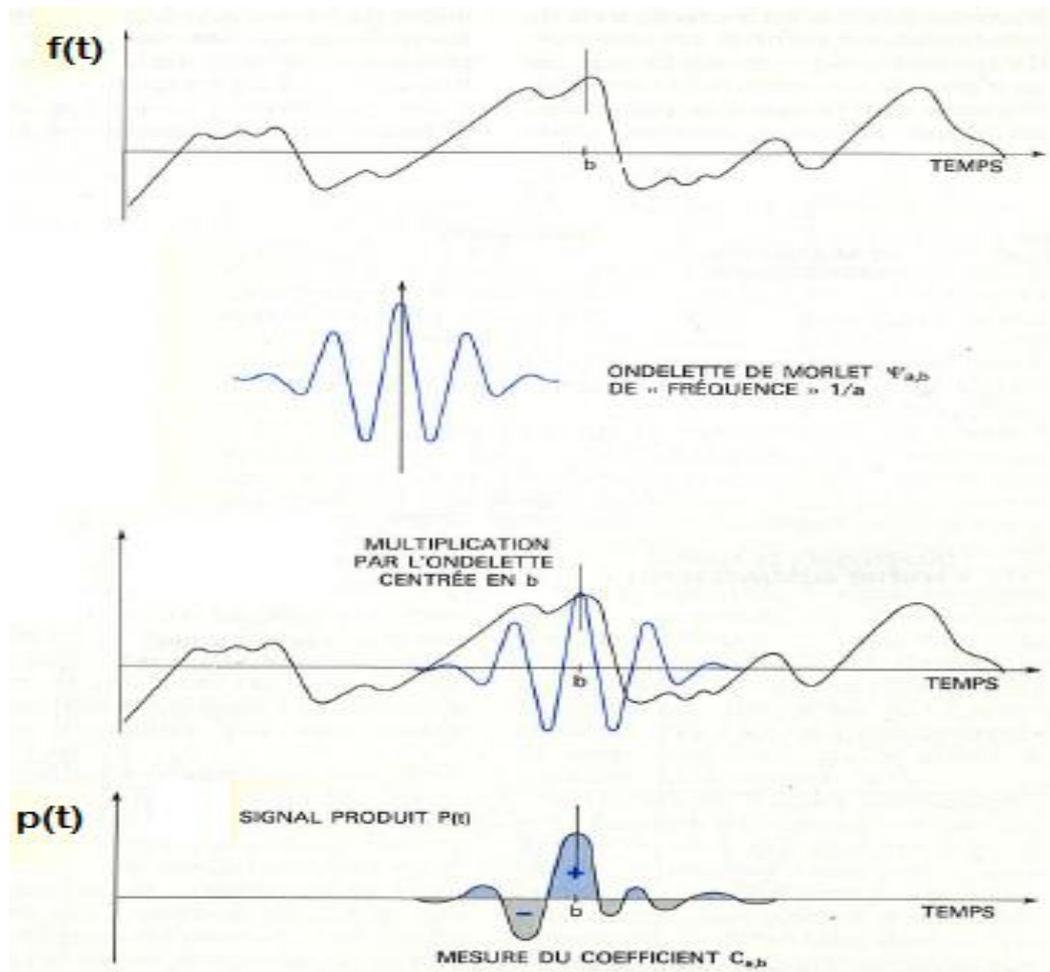


Figure 4.5 : Mesure du coefficient d'ondelette, exemple d'une ondelette de Morlet [Meyer, 1987].

Le coefficient d'ondelette dépend de la forme du signal au voisinage du temps b . Quand le signal est constant autour de ce temps « b », le coefficient d'ondelette est petit. Dans le cas contraire, c'est-à-dire que si le signal est irrégulier autour de ce point, le coefficient d'ondelette est beaucoup plus grand (Figure 4.6).

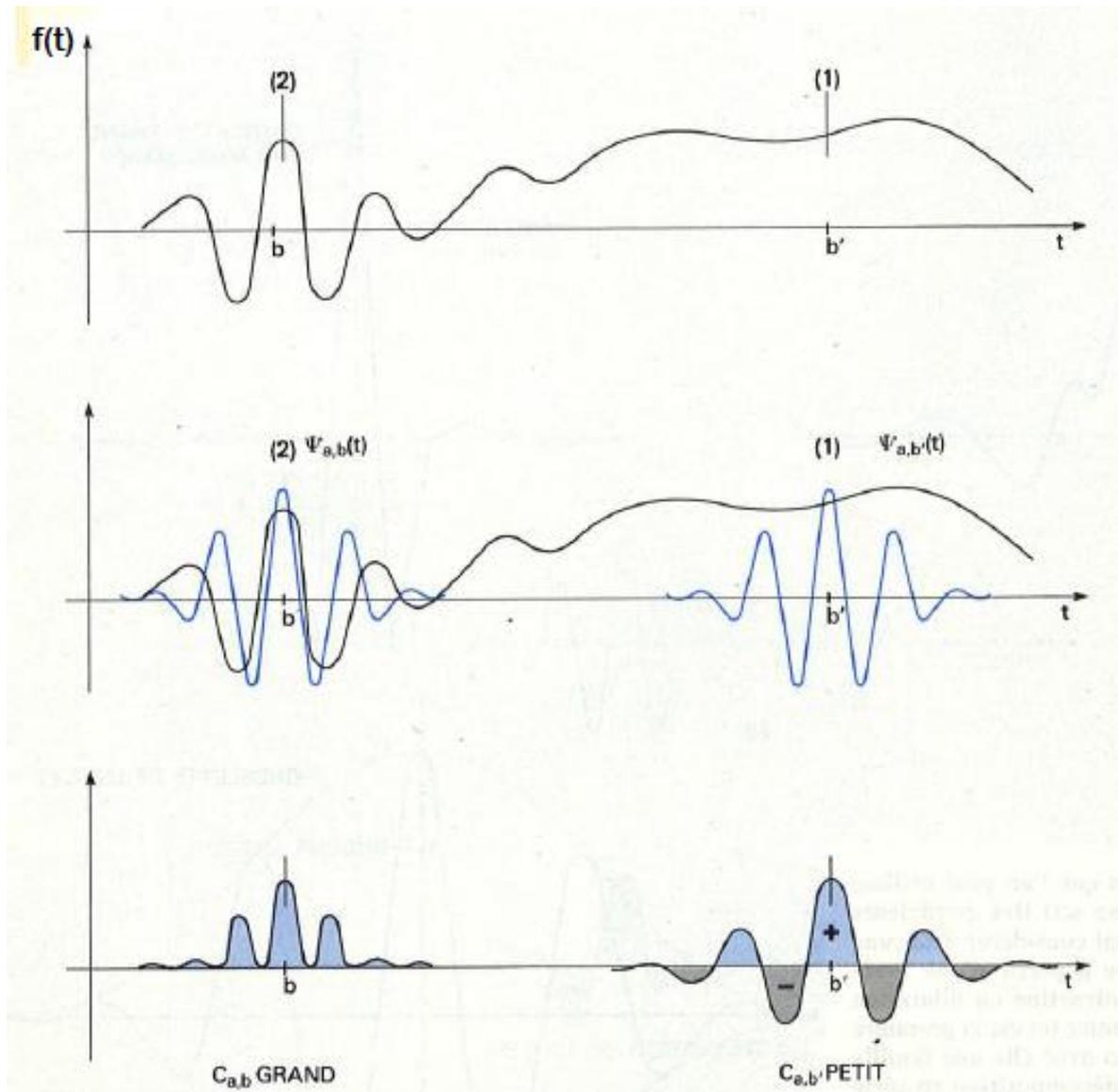


Figure 4.6 : Coefficient d'ondelette et forme du signal [Meyer, 1987].

L'analyse en ondelettes décompose le signal, en un ensemble de signaux qui le représentent. Ces signaux correspondent à des bandes de fréquences différentes. Ils peuvent être représentés sous forme de scalogramme.

Le scalogramme est une représentation analogue au spectrogramme de Fourier en deux ou trois dimensions. A deux dimensions, le spectre de puissance est représenté en temps-fréquence ou en temps-échelle. A trois dimensions (temps, fréquences et amplitude), l'axe des x représente le temps, l'axe des y représente l'échelle (ou la fréquence) et l'axe des z représente l'intensité du signal. Cette dernière est souvent représentée par des nuances de couleur ou de luminosité.

Dans ces représentations, la valeur exacte de la fréquence pour un temps bien précis n'est pas connue. En revanche, il est possible de déterminer la bande de fréquence correspondante à chaque intervalle de temps.

2.6.6. Niveau de signifiante

L'hypothèse nulle pour le spectre de puissance en ondelette suppose que les séries temporelles ont un spectre de puissance moyen, qui dans un scalogramme, se traduit par une couleur de fond. Si un pic dans le spectre de puissance des ondelettes est significativement au-dessus de ce spectre de fond, alors ce dernier peut être supposé être une caractéristique vraie avec un certain pourcentage de confiance [Torrence et Compo, 1998].

2.7. Choix de l'ondelette mère

Le choix de l'ondelette mère dépend du signal à analyser et des objectifs de l'utilisateur, il reste cependant très ouvert. Dans tous les cas, il est préférable de choisir l'ondelette dont la forme s'apparente au patron des fluctuations de la série temporelle étudiée [Nakken, 1999 cité par Anctil.F et Pelletier G, 2011]. En général, lorsque le but est uniquement le tracé du spectre de puissance, le choix de la fonction d'ondelette mère n'est pas critique et une fonction donnera les mêmes résultats qualitatifs qu'une autre [Torrence et Compo, 1998].

En pratique, dans l'analyse des séries temporelles, le choix reste mitigé. Certains auteurs préfèrent l'utilisation de l'ondelette de Morlet qui trace des crêtes et des creux à la manière d'une onde [Anctil F et Pelletier G, 2011]. D'autres auteurs préfèrent l'utilisation de l'ondelette de Paul parce que celle-ci permet une meilleure visualisation des fluctuations très localisées dans le temps, même si l'ondelette de Morlet offre une bonne résolution fréquentielle [Rossi, 2010]. Bien entendu comme énoncé précédemment, l'ondelette doit vérifier les critères de continuité et d'admissibilité.

Dans ce travail, différentes ondelettes seront testées afin de choisir celle qui sera la plus adaptée à nos objectifs.

2.8. Choix des échelles

Une fois la fonction d'ondelette choisie, il est nécessaire de choisir un ensemble d'échelles « s » à utiliser pour construire l'image la plus complète du signal. Pour une analyse en ondelettes, il est possible d'utiliser un ensemble arbitraire d'échelles choisi judicieusement pour bien s'adapter au signal à analyser.

Torrence et Compo [Torrence et Compo, 1998] recommandent d'écrire les échelles en tant que puissances fractionnaires de deux sous la forme suivante :

$$S_j = S_0 2^{j\delta_j}, j = 0, 1, \dots, J$$

$$J = \delta_j^{-1} \log_2(N\delta t/S_0)$$

s_0 est la plus petite échelle résoluble et J détermine la plus grande échelle. Le s_0 devra être choisi de telle sorte que la période de Fourier équivalente est d'environ $2\delta t$. D'après ces auteurs, le choix d'un δ_j suffisamment petit dépend de la longueur dans l'espace spectral de la fonction d'ondelette. Pour l'ondelette de Morlet, un δ_j d'environ 0,5 est la plus grande valeur qui donne un échantillonnage adéquat. Pour les autres fonctions d'ondelettes, une plus grande valeur peut être utilisée. Des valeurs plus petites que δ_j donnent une résolution plus fine [Torrence et Compo, 1998].

Le choix de l'échelle influe sur la largeur de l'ondelette. La figure 4.7 suivante illustre un exemple pour l'ondelette de Morlet (a) et le chapeau mexicain (b) à deux échelles différentes. La valeur de $s=1$ donne la courbe la plus localisée et $s = 2$ donne la courbe la plus étendue

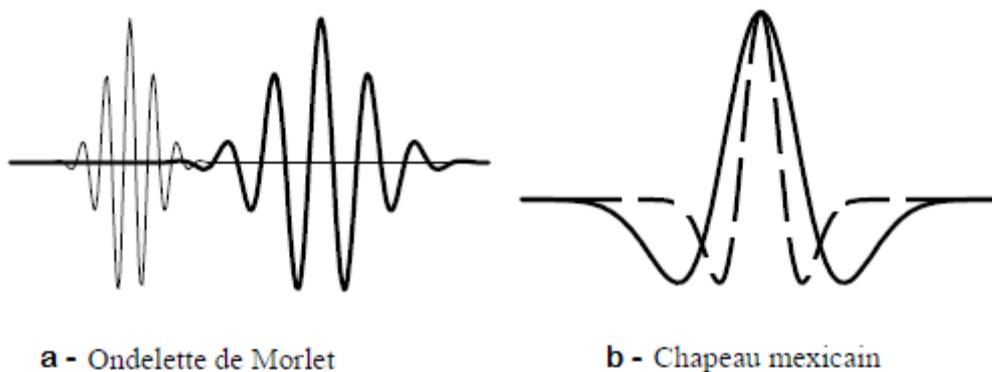


Figure 4.7 : L'ondelette de Morlet et le chapeau mexicain pour deux valeurs d'échelle [Truchetet, 1998].

La résolution d'une fonction d'ondelette est déterminée par l'équilibre entre la largeur dans l'espace réel et la largeur dans l'espace de Fourier. Une fonction étroite dans le temps aura une bonne résolution dans le temps mais une mauvaise résolution en fréquence, tandis qu'une fonction large dans le temps aura une mauvaise résolution dans le temps, mais une bonne résolution en fréquence.

2.9. Application des transformées en ondelettes aux séries du bassin du barrage Hammam Boughrara

2.9.1. Introduction

Pour étudier les tendances du changement climatique dans le bassin de Hammam Boughrara et déceler d'éventuels périodes sèche ou humide, il faut caractériser la variabilité des séries climatique représentant le bassin sur le court et long terme.

Dans cette partie de la thèse, la méthode des ondelettes décrite auparavant, va être appliquée aux séries climatiques et hydrologiques déjà analysées précédemment. L'objectif de cette application étant la recherche des potentialités que peut offrir cette méthode.

Il faut bien noter que cette méthode ne pose aucun préalable aux séries à analyser, notamment les hypothèses de stationnarité, de normalité ou tout autre critère limitatif exigé pour l'application de quelques méthodes déjà utilisées dans le chapitre précédent. La transformée en ondelette est justement adaptée pour l'étude des signaux non stationnaires, la seule exigence, et qui n'est pas propre à cette méthode, concerne les séries de données. Il faut des séries représentatives du phénomène à analyser dans la région étudiée. Elles doivent aussi être assez longues pour permettre un échantillonnage constant et suffisamment important pour identifier les différents modes de variabilité [Truchetet, 1998].

Avant l'application de la méthode des ondelettes, une recherche de la tendance par lissage polynomial sera testée. Cette méthode est généralement utilisée comme analyse préliminaire pour dégager les grandes tendances à retrouver par les analyses en ondelettes ou d'autres méthodes.

2.9.2. Régression polynomiale

La régression ou l'ajustement polynomial est une autre méthode du lissage du signal temporel à l'instar des moyennes mobiles. Le principe consiste à ajuster les points de la série par des polynômes locaux. La méthode est décrite comme adaptée pour l'analyse à long terme des séries pluviométriques ou climatiques [Rossi, 2010].

Cet ajustement appliqué aux séries des différentes stations permet de noter un certain nombre de points.

En ce qui concerne les précipitations annuelles, les conclusions sont dans leurs grandes majorités semblables aux résultats des méthodes appliquées dans le chapitre trois, particulièrement celles qui se basent sur les indices. En effet, les figures de 4.8 à 4.11 concernant

les pluviométries annuelles des quatre stations étudiées, Hammam Boughrara, Maghnia, Beni Bahdel et Zenata montrent d'importantes fluctuations avec une tendance très importante à la baisse vers les années 1970-1973 pour les quatre stations. Il en suit ensuite une tendance à la hausse vers les années 1990 pour trois stations sauf Zenata, qui reste presque constamment déficitaire.

On notera pour Hammam Boughrara, une rehausse significative de la courbe de tendance autour des années 2008-2009. Pour Zenata et Beni Bahdel cette hausse reste insignifiante.

Pour la station de Zenata, les ruptures détectées par la segmentation de Hubert sont retrouvées avec notamment les périodes longue et sèche des années récentes.

Pour les stations qui présentent des séries démarrant aux environs des années 70 (Hammam Boughrara et Maghnia,) et comme il est visible sur les figures 4.8 et 4.9, une tendance récente à la remonté est notée. Cette remonté n'est pas effective, mais c'est une diminution du déficit.

Pour les stations dont les périodes de fonctionnement vont au-delà des années 70, l'existence de la période déficitaire récente est confirmée (Béni Bahdel et Zenata).

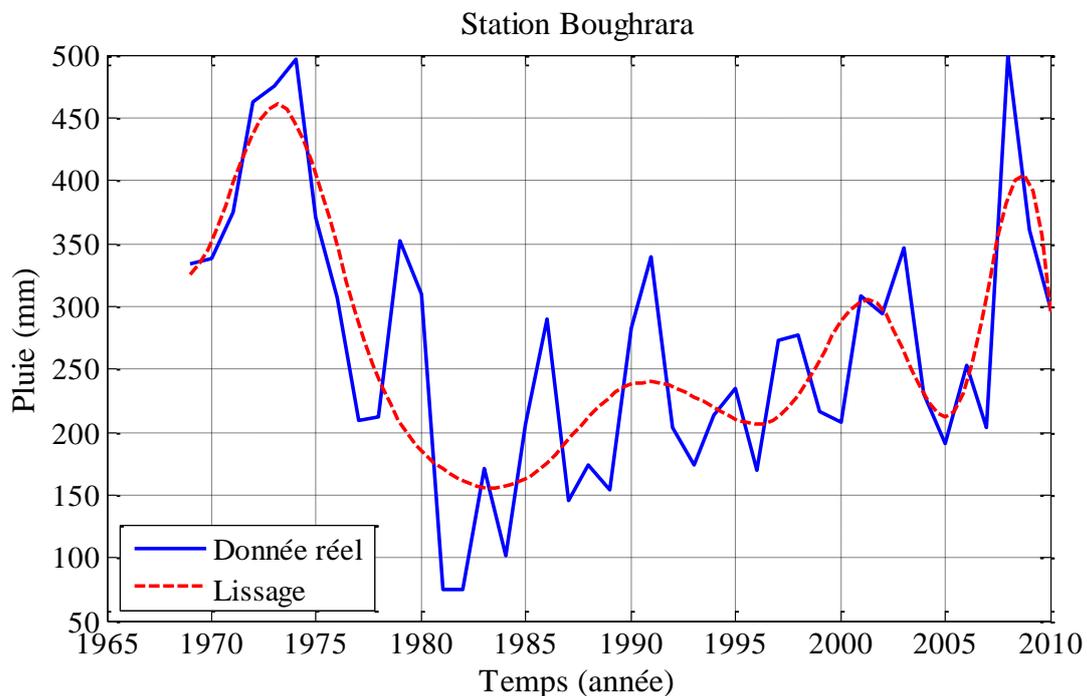


Figure 4.8 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Hammam Boughrara.

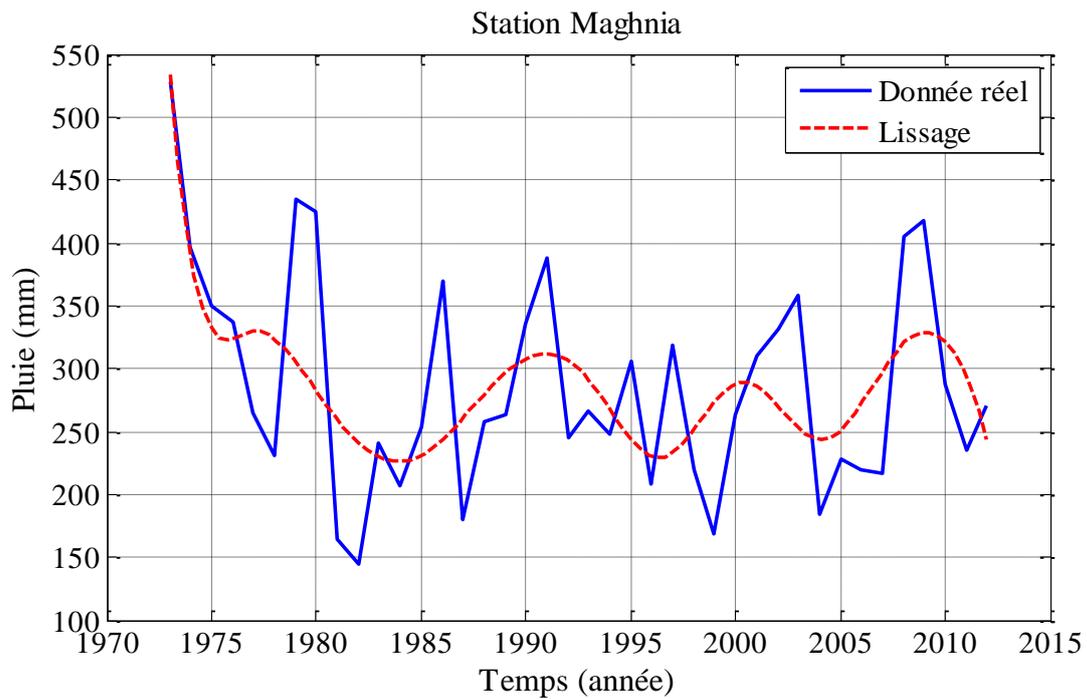


Figure 4.9 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Maghnia.

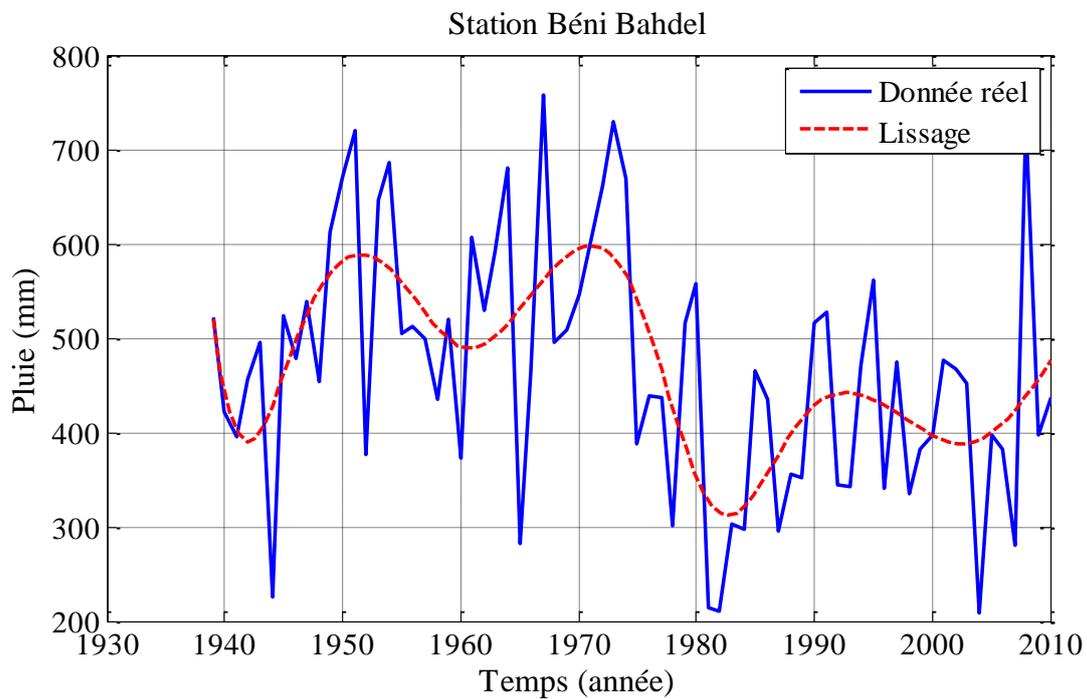


Figure 4.10 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Béni Bahdel.

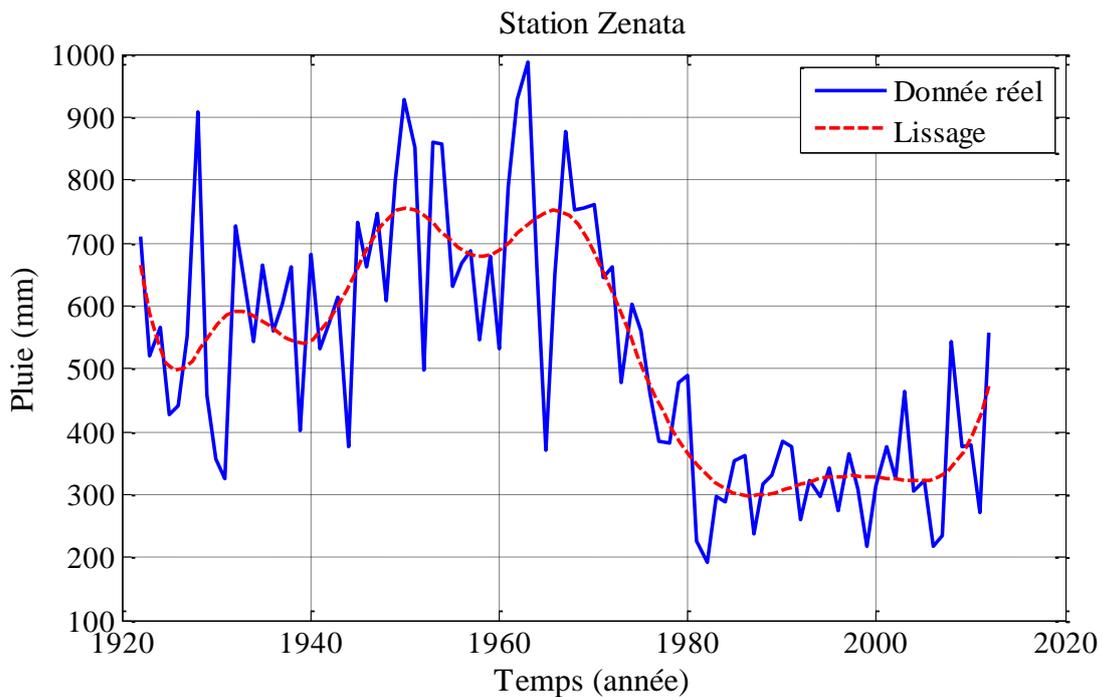


Figure 4.11 : Ajustement polynomial des précipitations annuelles de la station de Zenata.

L'ajustement polynomial effectué sur les séries de températures des stations de Maghnia (Figure 4.12) et de Zenata (Figure 4.13) montre que les deux régions ont connu une hausse progressive de leurs températures. Cette tendance à la hausse va dans le sens des projections futures du modèle ARIMA.

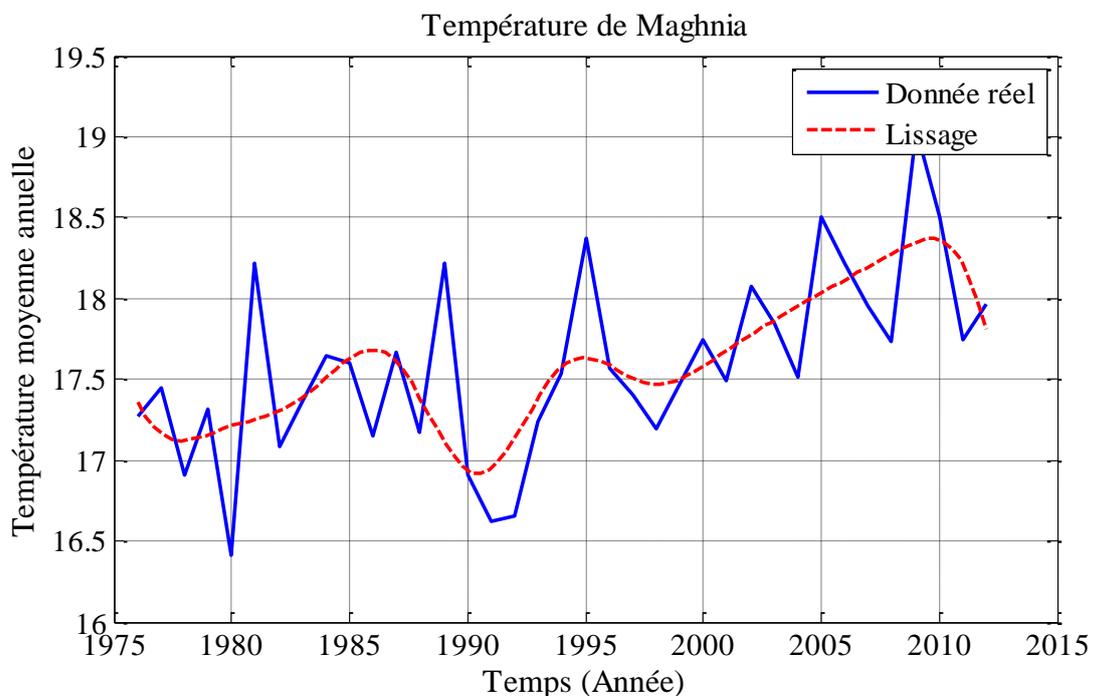


Figure 4.12 : Ajustement polynomial des températures de la station de Maghnia.

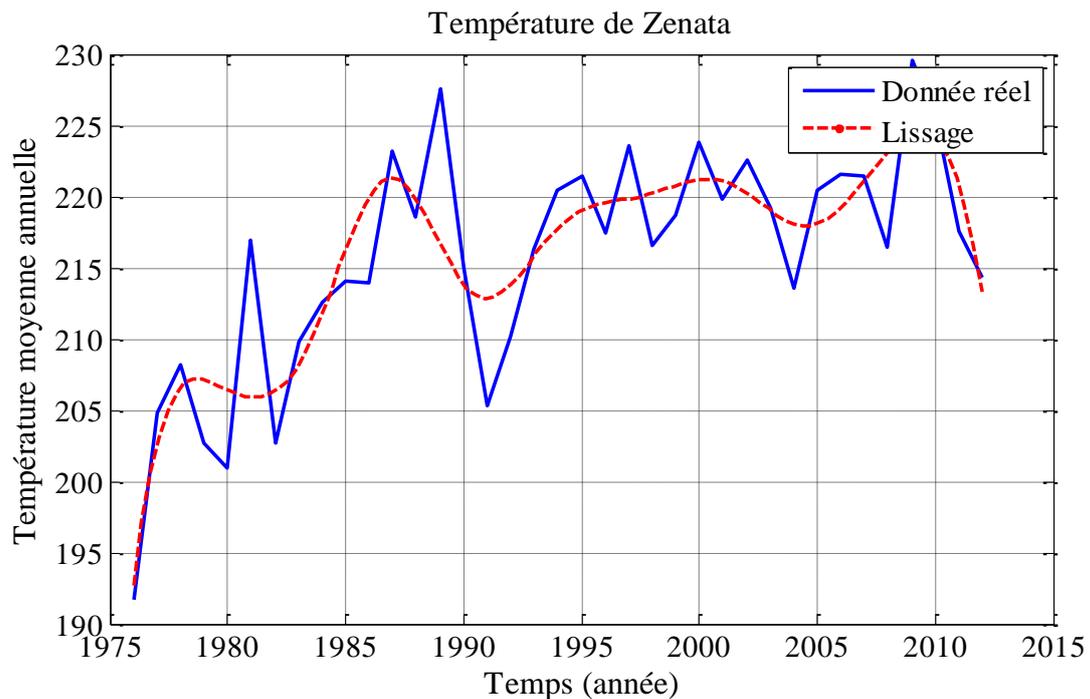


Figure 4.13: Ajustement polynomial des températures de la station de Zenata.

Quant à la série des apports au niveau du barrage Hammam Boughrara (Figure 4.14), la régression polynomiale montre une fluctuation cyclique avec une différence peu significative de l'allure générale aux différents cycles. Ces cycles qui sont positionnés dans le temps entre 1924 et 1945, entre 1945 et 1965 et entre 1965 et 1985 ont été diagnostiqués par la moyenne mobile et le cumul de l'écart standardisé à la moyenne.

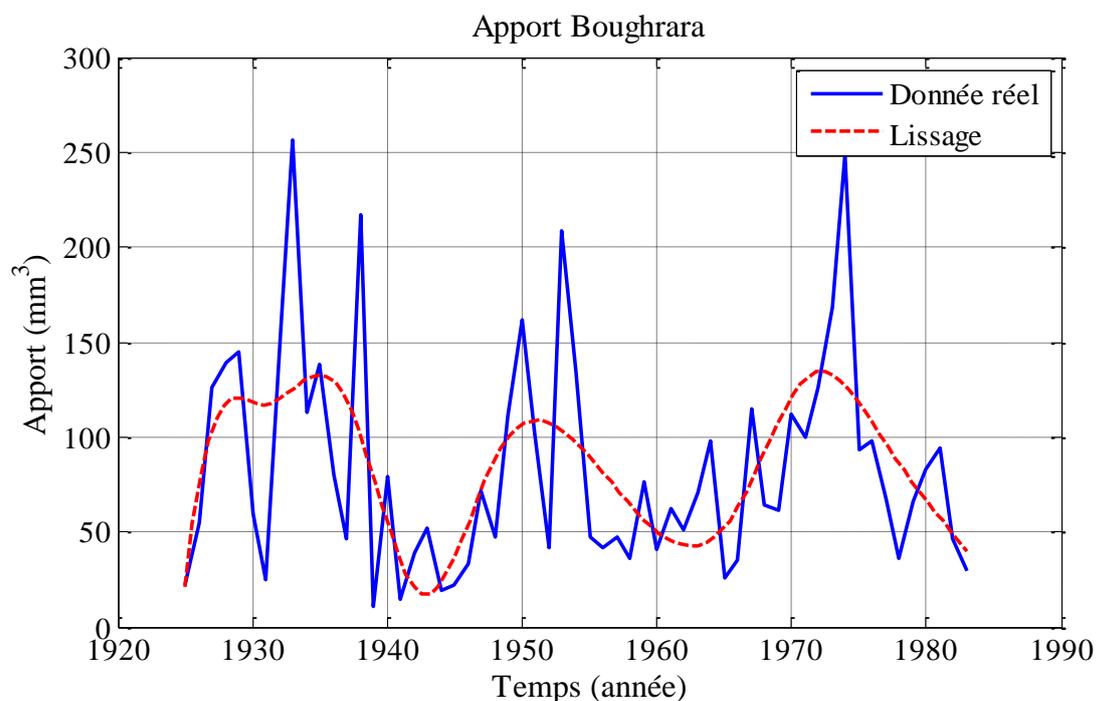


Figure 4.14 : Ajustement polynomial des apports au niveau du barrage Hammam Boughrara.

2.9.3. Approche par ondelettes

La méthode de régression polynomiale a permis de visualiser les tendances générales des séries chronologiques utilisées. Dans ce paragraphe, ce sont les transformations par ondelettes qui vont être exploitées pour étudier les fluctuations climatiques et déceler d'éventuelles ruptures dans le temps. La transformation en ondelette permet de faire ressortir les informations contenues dans la composante fréquentielle du signal. La fréquence dépend du mode de changement de la variable hydrologique ou climatique ; Une haute fréquence correspond à un changement rapide de cette variable, une basse fréquence à un changement lent et une fréquence nulle quand il n'y a aucun changement.

- **Choix des ondelettes à appliquer**

La littérature scientifique liste quatre ondelettes qui sont largement utilisées dans la pratique : ce sont les ondelettes de Morlet, de Daubechies, de Paul et le chapeau mexicain. Le choix de l'une ou plusieurs ondelettes parmi celles-ci est délicat. De même, les résultats des analyses dépendent de deux facteurs importants qui sont les facteurs d'échelle et de translation.

Pour le choix de l'ondelette et pour fixer les paramètres d'échelle et de translation qui donnent la meilleure résolution de notre signal, une étude paramétrée avec les quatre ondelettes a été effectuée. Les spectres de puissance obtenus par l'application des quatre ondelettes citées plus haut aux précipitations de Hammam Boughrara (figures 4.15 à 4.18) ont une allure similaire. L'ondelette de Morlet (Figure 4.15) et celle de Daubechies (Figure 4.16) donnent la même qualité d'information en moyenne et haute fréquences. En basses fréquences, l'ondelette de Morlet assure une meilleure résolution que celle de Daubechies. Le chapeau mexicain (Figure 4.17) donne une représentation similaire, mais ne marque pas tous les événements avec la même clarté. En revanche l'ondelette de Paul (Figure 4.18) marque exceptionnellement les événements extrêmes (fluctuations importantes) sur le long terme sans montrer trop de détails.

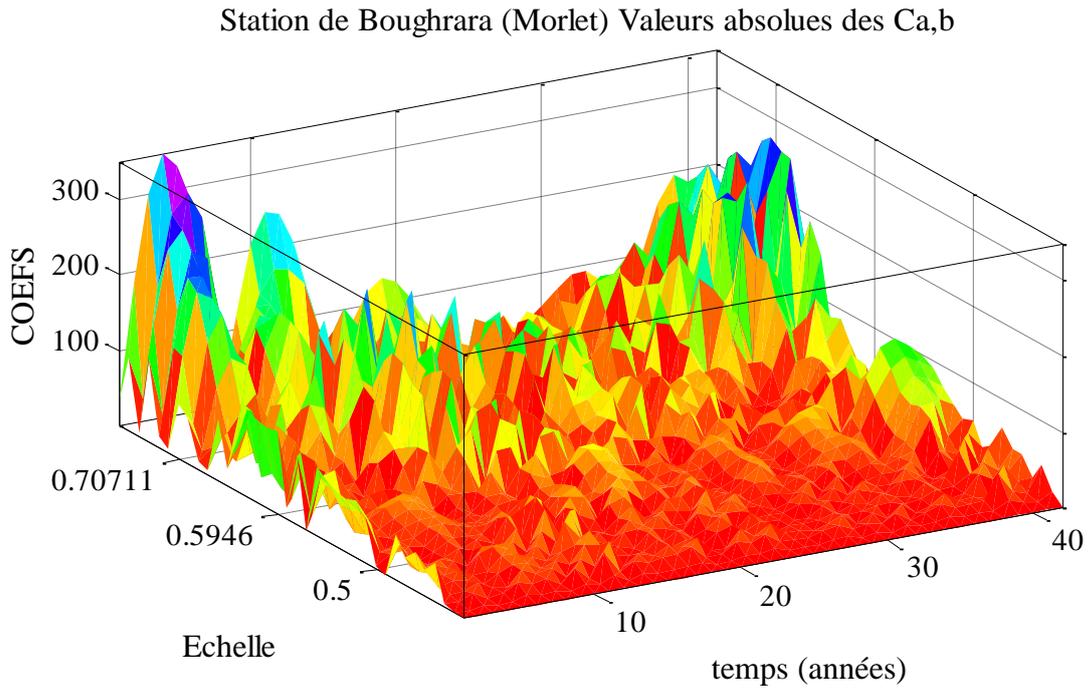


Figure 4.15: Analyse des précipitations de la station Hammam Boughrara par l'ondelette de Morlet.

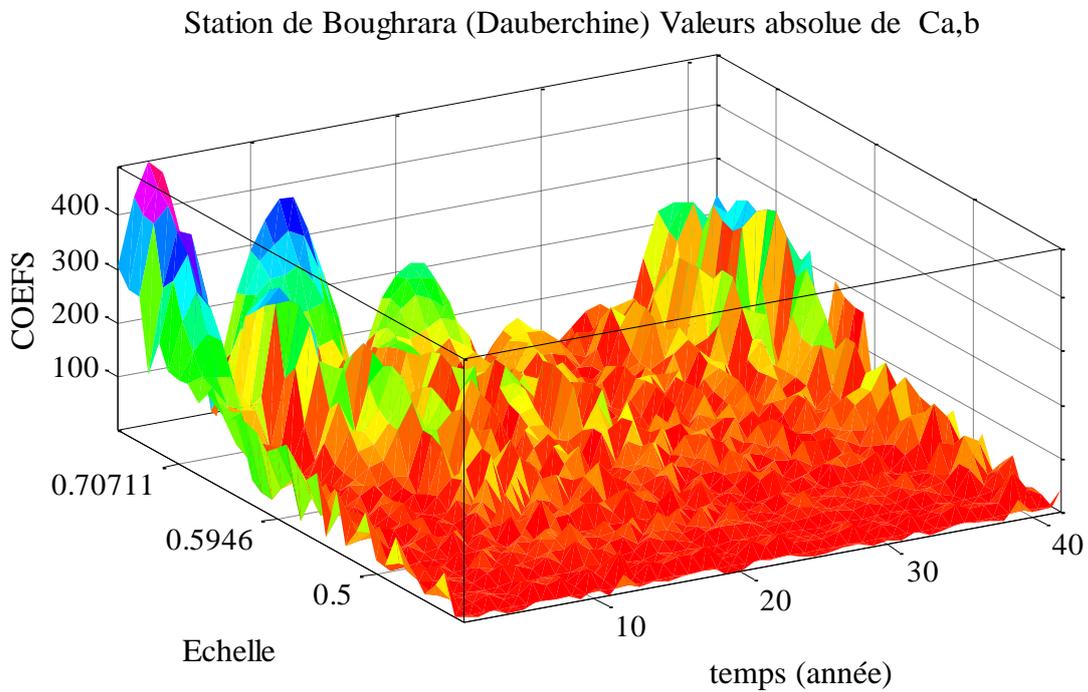


Figure 4.16 : Analyse des précipitations de la station Hammam Boughrara par l'ondelette de Daubechies.

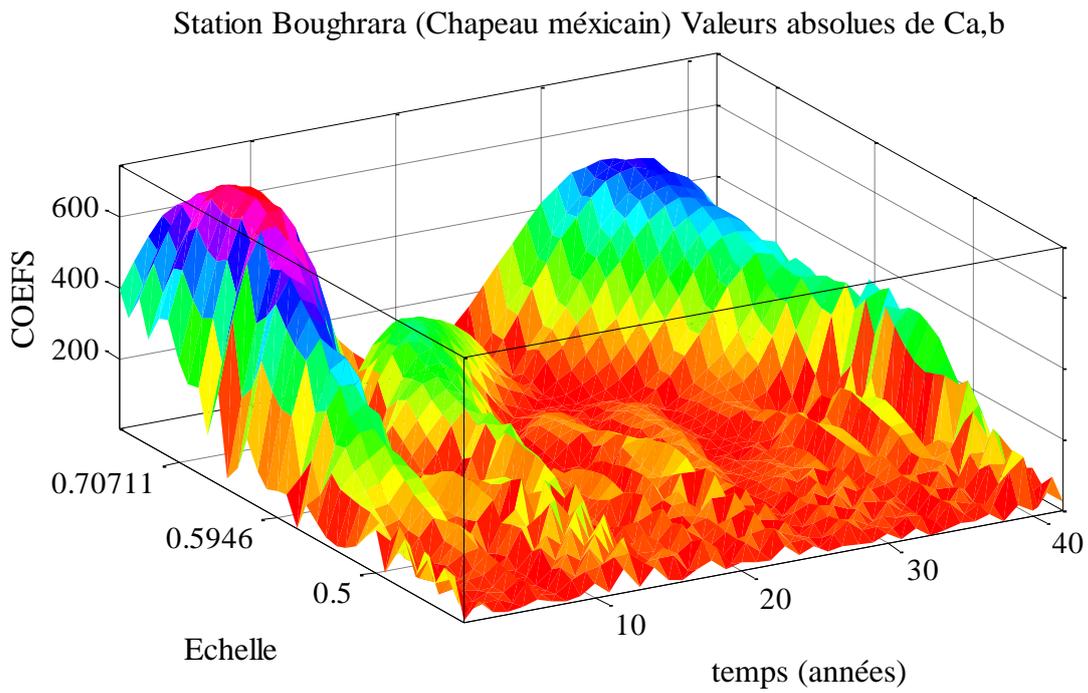


Figure 4.17 : Analyse des précipitations de la station Hammam Boughrara par le chapeau mexicain.

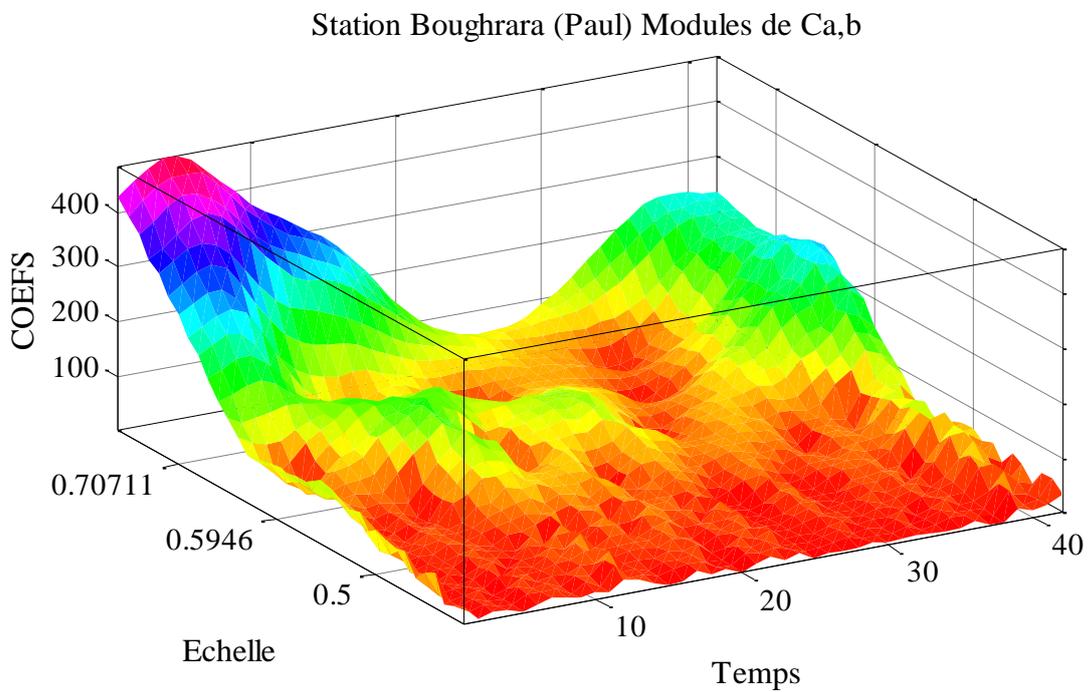


Figure 4.18: Analyse des précipitations de la station Hammam Boughrara par l'ondelette de Paul.

Pour ces raisons, et en quête de la meilleure lisibilité, notre choix s'est porté sur les ondelettes de Morlet et de Paul pour l'analyse des différentes séries, avec des facteurs d'échelle et de translation $\delta j = 0,125$ et $\delta t = 0,25$ qui ont données la meilleure résolution.

- **Application aux précipitations de la station Hammam Bouhrara:**

L'application de l'ondelette de Morlet aux précipitations de la station Hammam Bouhrara a fourni le spectre de puissance représenté sur la figure 4.19. Ce spectre est structuré montrant l'existence de plusieurs fluctuations identifiées à différentes échelles de temps. A court terme (2-4ans), le spectre montre une structure épineuse (séquences à forte énergie, intercalée par des périodes de faible énergie), mettant en exergue l'irrégularité des pluies annuelles. Sur la bande des fréquences 6-8ans, les fluctuations prennent un aspect cyclique. Deux cycles pluvieux sont détectés : le premier se situe entre 1972 et 1975 et le second de moindre intensité aux alentours de 2007-2008. Sur cette même bande (6-8ans) apparait une rupture (faible énergie) unique pendant la période 1981-1984 marquant des années non ou très peu pluvieuses. Sur la bande de fréquence 10-12 ans, une rupture dans le signal est localisée entre 1992 et 1998 indiquant une période de déficit.

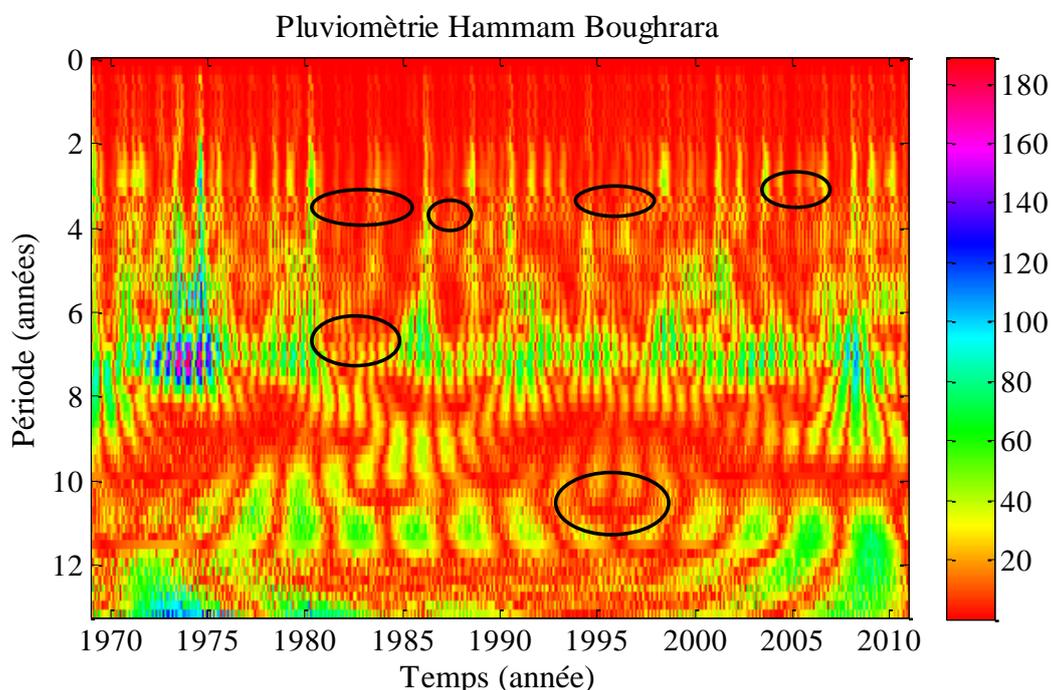


Figure 4.19 : Analyse des précipitations de la station Hammam Bouhrara par l'ondelette de Morlet.

L'analyse de cette série par l'ondelette de Paul donne le spectre de la figure 4.20. Ce spectre montre une seule bande dominante (8-12 ans) sur laquelle se concentre l'essentiel de l'énergie

en faisant ressortir une période de forte énergie concentrée entre les années 1972 et 1975 et une deuxième moins importante aux alentours de l'année 2008. Des périodes de très faibles énergies apparaissent, une continue entre 1981 et 1985, d'autres moins longues 1996-1998.

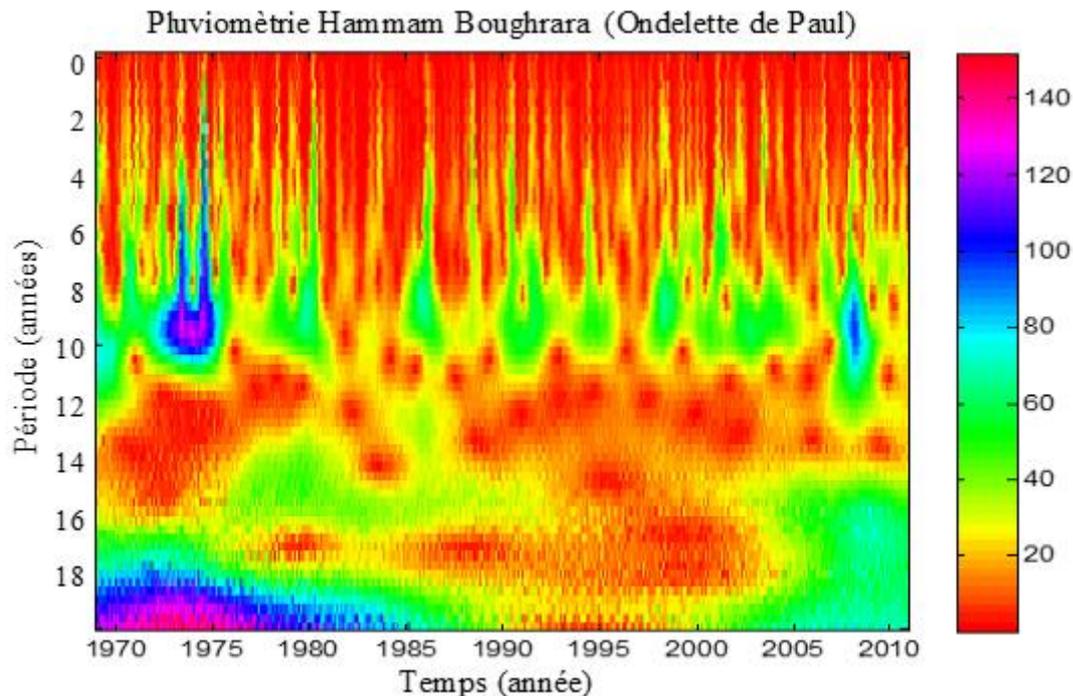


Figure 4.20 : Analyse des précipitations de la station Hammam Boughrara par l'ondelette de Paul.

- **Application aux précipitations de Maghnia**

Pour l'ondelette de Morlet, le spectre de puissance de la station de Maghnia (Figure 4.21) montre deux bandes dominantes 6-8 ans et 10-12 ans. Aucune de ces bandes ne présente de rupture nette. On observe cependant une diminution en puissance sur la bande 10-12 ans (c'est à dire le long terme) entre les années 1992 et 1998. Sur la bande 6-8 ans, on retrouve un aspect cyclique au même titre que celui trouvé à la station de Hammam Boughrara, ne présentant pas de rupture significative. Néanmoins, des diminutions en énergie par rapport au spectre totale sont notées aux années 82-83 et après 2010. Sur le court terme, la bande 2-4 ans, l'irrégularité des pluies annuelles est ressentie, mais avec moins d'ampleur que dans les autres stations.

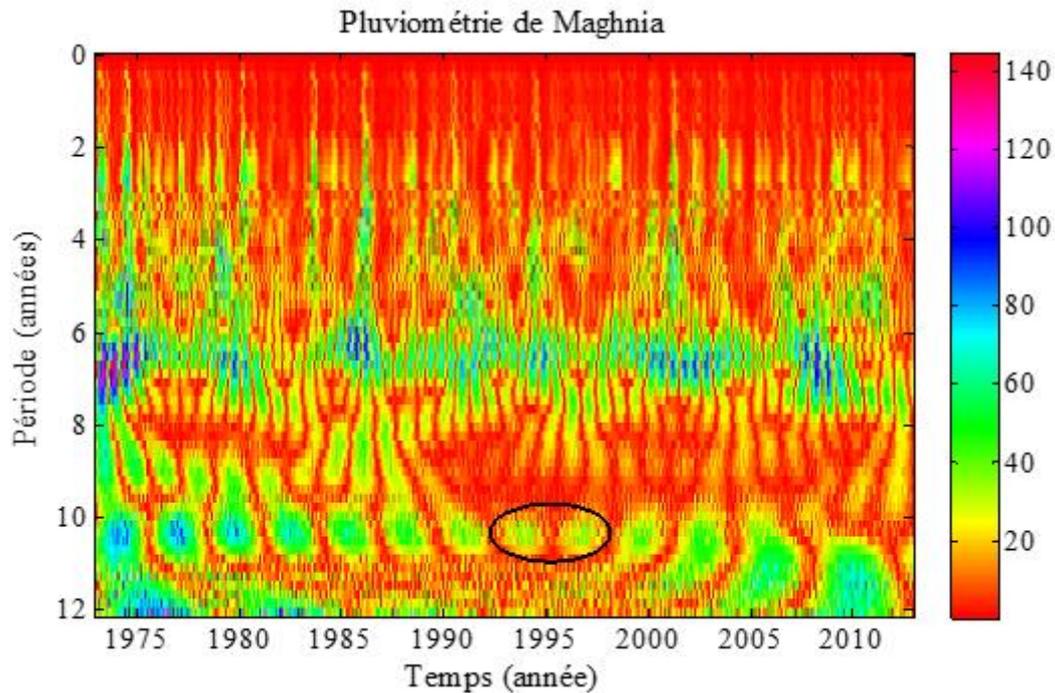


Figure 4.21 : Analyse des précipitations de la station de Maghnia par l'ondelette de Morlet.

Le spectre de puissance obtenu par l'application de l'ondelette de Paul et représenté sur la figure 4.22 révèle une dominance de la bande 8-12 ans mettant en exergue des fluctuations, avec la plus forte énergie avant 1975, suivie d'une baisse quasi-constante avec un minimum en 1982-1983 et en 2010. La légère hausse des pluies enregistrée aux alentours de 2007-2008 est retrouvée.

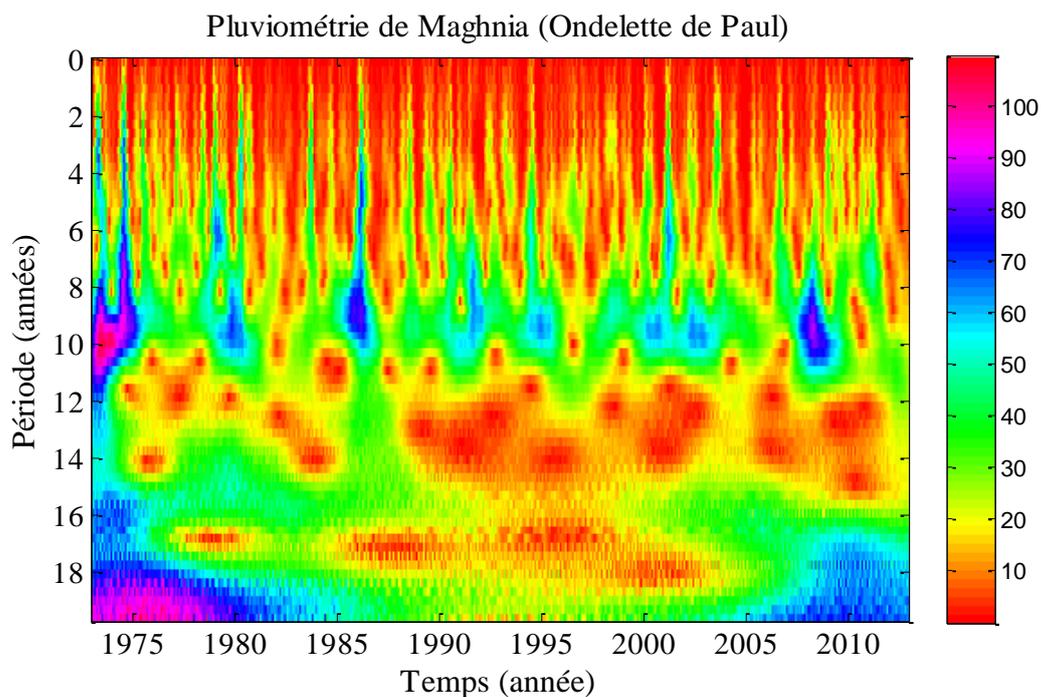


Figure 4.22 : Analyse des précipitations de la station de Maghnia par l'ondelette de Paul.

- **Application aux précipitations de Béni Bahdel**

L'analyse spectrale de la série de pluies de la station de Béni Bahdel (Figure 2.23) révèle la présence d'une bande de fréquence préférentielle 10-12 ans représentant le moyen terme et une deuxième à 15-18 ans dans lesquelles se regroupe une part très importante de la variance. Ainsi, plusieurs fluctuations sont observées. Sur la bande (10-12 ans), une diminution dans le spectre est enregistrée sur la période 1982-1985 et une autre sur la période 2003-2007. Sur la bande (15-18 ans) et qui marquent le long terme, trois périodes particulières sont détectées : 1942-1948, 1956-1962 et 1995-2000 dans lesquelles une diminution est enregistrée.

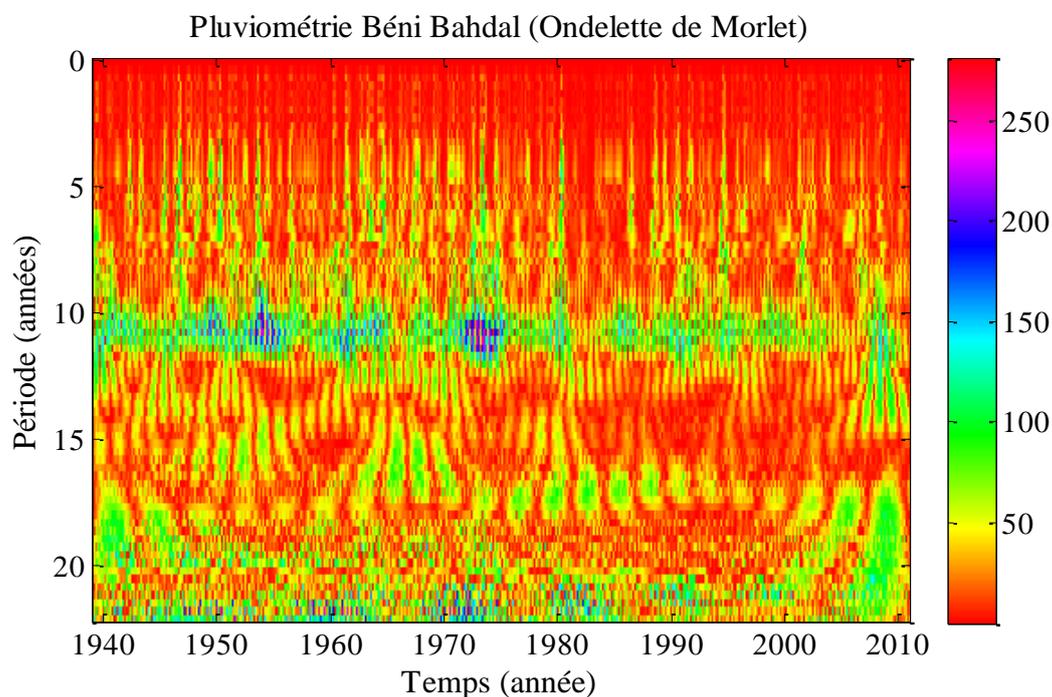


Figure 4.23 : Analyse des précipitations de la station de Béni Bahdel par l'ondelette de Morlet.

L'ondelette de Paul appliquée à la série de la station de Béni Bahdel (Figure 4.24) fait apparaître une bande dominante 12-18 ans avec une puissance quasi constante entrecoupée par des zones à faibles énergie localisés principalement aux alentours de 1966, 1982 et sur la période 2005-2008. Des zones à énergie plus fortes sont localisées aux alentours de 1955 et 1972.

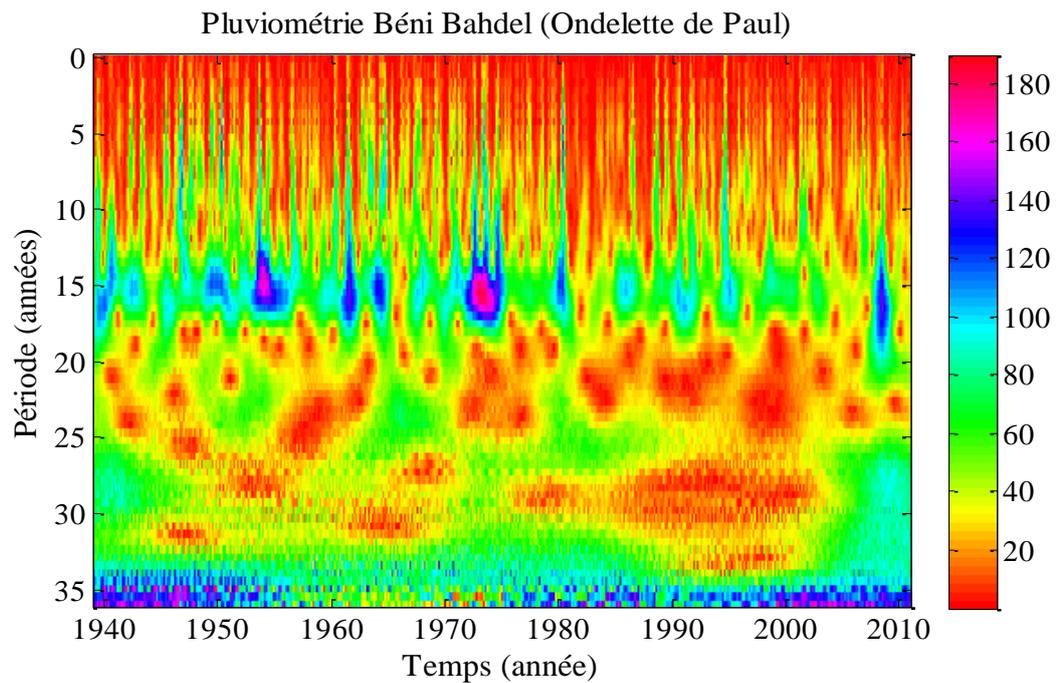


Figure 4.24 : Analyse des précipitations de la station Béni Bahdel par l'ondelette de Paul.

- **Application aux précipitations de Zenata**

Pour l'ondelette de Morlet, l'analyse du spectre d'énergie de la série pluviométrique de Zenata (figure 4.25) montre une rupture en 1982, avec une discontinuité sur la période 1982-1989 dans la bande de puissance caractérisant le moyen terme (12-15ans), et sur les périodes 1935-1950 et 1972-2012 dans la bande caractérisant le long terme (20-22ans).

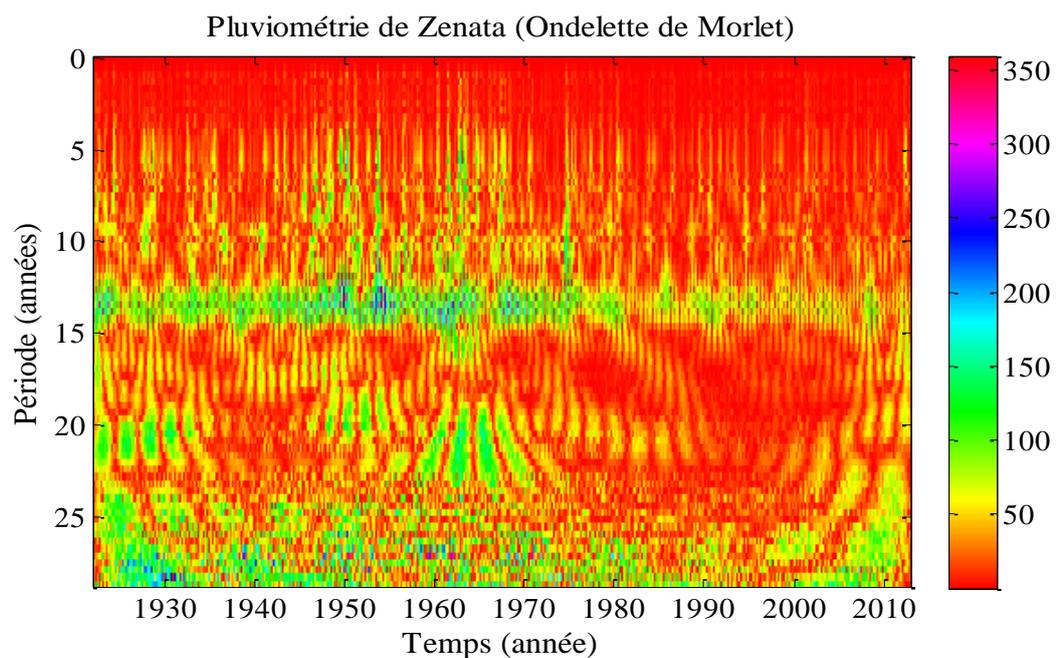


Figure 4.25 : Analyse des précipitations de la station de Zenata par l'ondelette de Morlet.

Le spectre de puissance de l'ondelette de Paul (Figure 4.26) montre des diminutions très marquées qui se succèdent à partir de l'année 1982, l'énergie la plus forte sur cette bande (16-22 ans) se concentre entre 1948 et 1964.

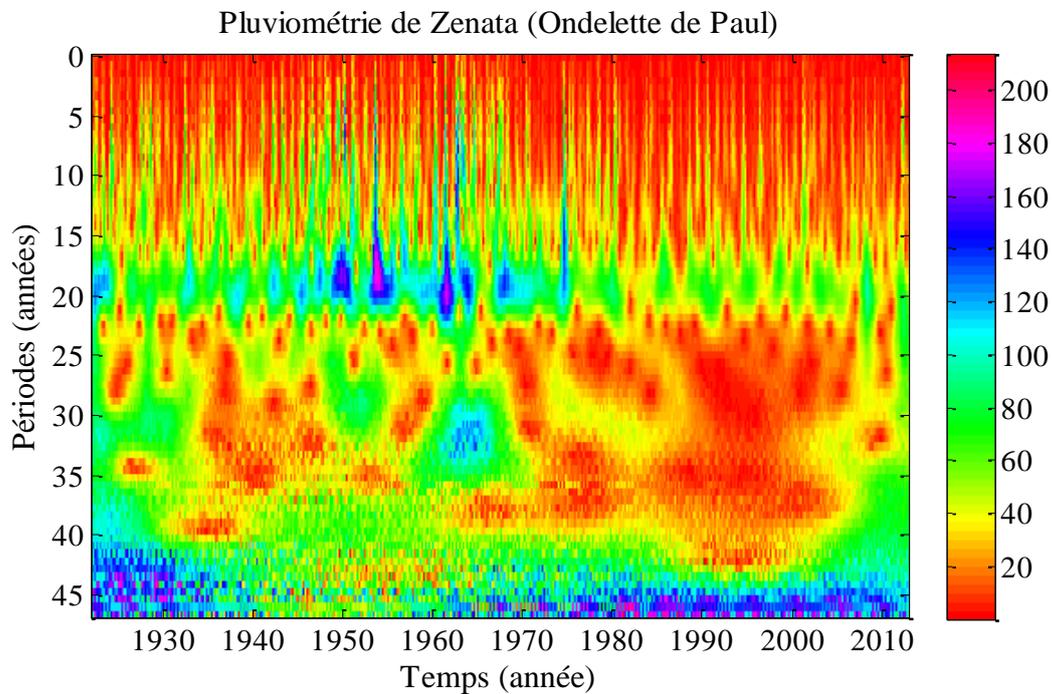


Figure 4.26: Analyse des précipitations de la station de Zenata par l'ondelette de Paul

- **Application aux apports du barrage Hammam Boughrara**

Dans l'analyse des apports par l'ondelette de Morlet (figure 4.27), une structuration dans la variabilité des apports avec un aspect cyclique est mise en évidence, ce qui a été déjà détecté par le lissage polynomial ainsi que les méthodes utilisant les indices du chapitre 3. Des cycles bien distincts apparaissent, accentués sur la bande de fréquence 8-10 ans, avec une rupture de continuité à partir de 1940, marquant une diminution continue de la pluie jusqu'à 1948. Cette période est suivie d'un épisode pluvieux continu jusqu'à l'année 1955. Entre 1955 et 1958, une autre période de diminution des précipitations apparaît, moins forte que la première. Un dernier événement déficitaire est mis en évidence en 1983.

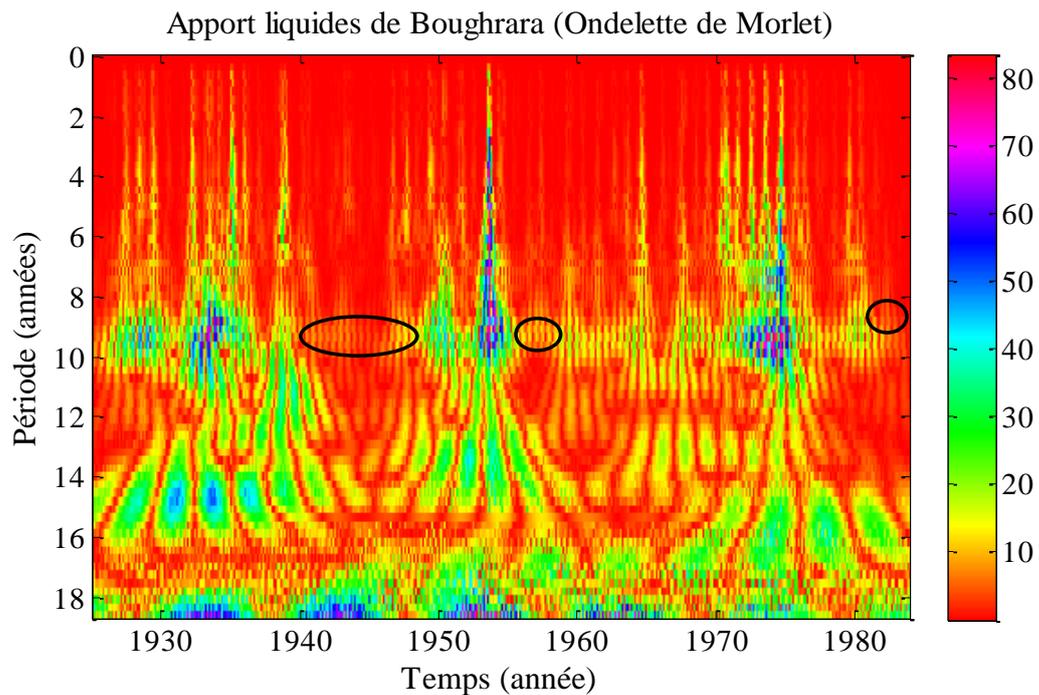


Figure 4.27 : Analyse des apports du barrage Hammam Boughrara par l'ondelette de Morlet.

L'ondelette de Paul appliquée aux apports (figure 4.28) donne un spectre similaire à celui de Morlet montrant un aspect cyclique sur la bande dominante 12-16 ans, avec une énergie très faible sur les périodes 1940/1948, 1954/1970 et à partir de l'année 1976.

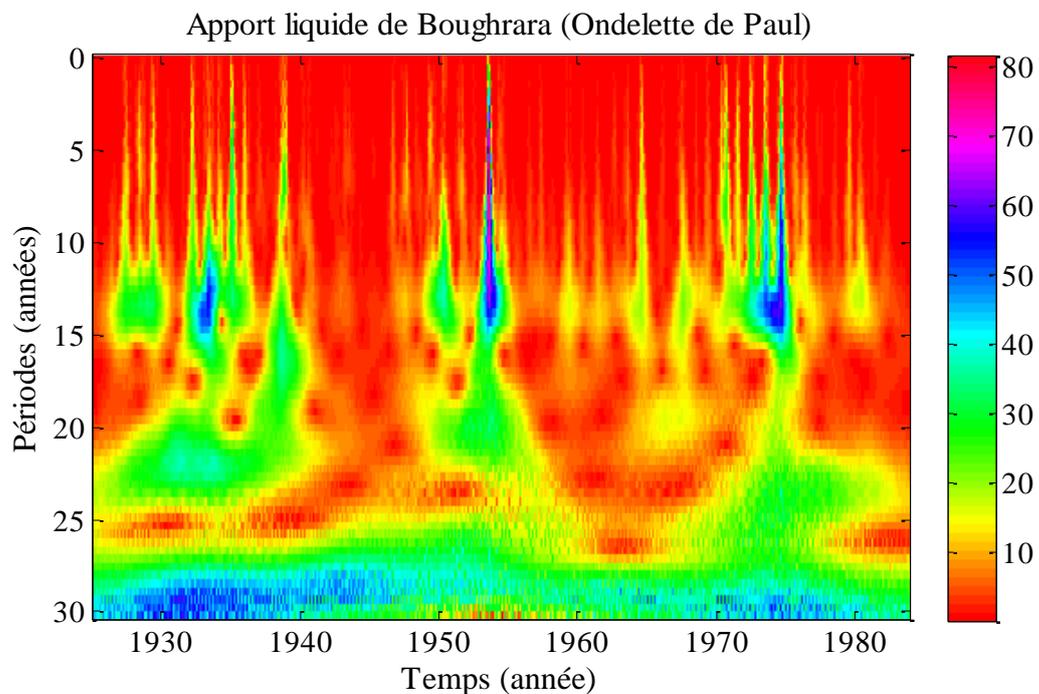


Figure 4.28 : Analyse des apports du barrage Hammam Boughrara par l'ondelette de Paul.

3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'utilisation des transformées par ondelettes pour étudier la variabilité climatique. Avant cela, un lissage des séries par ajustement polynomial a été réalisé. Cet ajustement a confirmé les grandes tendances décelées par les méthodes classiques décrites dans le chapitre trois, c'est-à-dire une diminution des précipitations et une augmentation des températures les trente dernières années par rapport aux années antérieures aux années 70.

La méthode des ondelettes présente l'avantage de se libérer des critères limitatifs rencontrés dans certains tests comme la linéarité, la stationnarité, etc. Cette méthode est aussi sensée mieux décrire la variabilité cyclique des phénomènes étudiés. Néanmoins, elle présente l'inconvénient de ne pas être quantitative et dont l'interprétation des résultats reste difficile à cerner. Globalement, les résultats rejoignent ceux obtenus par les méthodes décrites précédemment. En général, les cycles que ça soit sec ou humides sont mieux mis en évidence sauf pour la station de Zenata où l'interprétation de son spectrogramme est moins évidente.

En effet, la puissance du spectre (couleur) est déterminée en fonction de la valeur maximale du signal contenu dans la série à analyser. La progression des couleurs est la même, mais leurs valeurs significatives changent d'une série à une autre. Or, pour le signal de la station de Zenata, il est plus important par rapport aux autres stations, de plus la durée des enregistrements s'étale sur une très longue période. En conséquence, l'information pour certains événements est noyée dans la longueur de la chronique et dans la différence entre les valeurs extrêmes.

Conclusion générale

Parler aujourd'hui de la sécheresse dans l'Ouest du pays est dépassé dans la mesure où les publications dans ce sens ont foisonné à partir du début des années 2000. Le bassin versant de la Tafna en particulier a servi de champ d'application de nombreuses méthodes qui permettent à l'aide des enregistrements de précipitations ou de températures de déceler des changements dans ces séries. Ces changements, quand ils existent, sont souvent attribués au changement climatique dont le monde entier parle. La communauté scientifique considère actuellement ce changement comme une réalité. Il est accusé d'être la principale cause de l'élévation des températures au niveau de la surface du globe. En ce qui concerne la diminution des précipitations ou l'augmentation des extrêmes, les avis ne sont pas tranchés.

Dans notre cas, il était surtout question d'étudier les méthodes et les outils qui servent à étudier les séries hydro-climatiques et notamment celles qui permettent de déceler et de caractériser les sécheresses. Le champ d'application choisi est le bassin versant du barrage Hammam Boughrara. Ce choix est motivé par plusieurs raisons dont la plus importante est que ce barrage a été réalisé plusieurs années après la phase de sécheresse qu'a connue la région et que les chiffres de gestion n'ont jamais fait l'objet d'une réactualisation. Le climat qui règne sur le bassin de ce barrage est du type semi-aride, c'est-à-dire caractérisé par l'existence de deux saisons distinctes, une saison sèche et une saison humide. La saison sèche est caractérisée par des précipitations faibles et des températures hautes, conduisant à des taux d'évaporation élevée et à un faible volume des eaux mobilisées.

Cette faiblesse des eaux mobilisées est due aussi à la variabilité climatique et à la sécheresse qui s'est installée dans la région. Les méthodes servant à étudier les séries hydro-climatiques sont nombreuses et chacune présente des avantages et des limites. Ces méthodes ont été classées selon les outils qu'elles utilisent : les méthodes basées sur les indices, les méthodes donnant les tendances, les méthodes basées sur les tests statistiques et enfin la méthode des ondelettes.

Les méthodes basées sur les indices sont faciles d'utilisation et d'interprétation. Néanmoins, ils ne donnent que des informations localisées dans le temps. Une année est décrite comme humide ou sèche en fonction de la valeur que prend cet indice en cette année. L'indice standard des précipitations (SPI) suppose que les enregistrements des séries suivent une distribution normale. L'écart standardisé à la moyenne ne pose pas ce préalable, ce qui le rend plus

utilisable. Cet indice à travers le cumul présente l'avantage d'indiquer les fluctuations et les tendances.

Les méthodes recensées qui donnent des indications sur les tendances sont au nombre de deux : la méthode des moyennes mobiles et l'ajustement polynomiales. La première est facile à mettre en œuvre mais d'utilisation limitée car elle ne donne des résultats interprétables que sur les moyennes annuelles. En plus, elle pose le problème de l'ordre à prendre en compte. La méthode du lissage polynomiale est plus élaborée scientifiquement et présente l'avantage d'être applicable pour les années ou les mois.

Pour les méthodes qui utilisent les tests statistiques, elles ont l'avantage de s'appuyer sur des concepts mathématiques donnant plus de poids à leurs pronostics. Néanmoins, certaines posent des hypothèses préalables sur les données, ce qui limite leur utilisation.

La dernière méthode testée dans ce travail est celle des ondelettes. C'est une méthode qui sert à étudier les séries chronologiques, ne pose pas d'hypothèse préalable mais d'interprétation délicate. Si cette méthode est sensée mettre mieux en évidence les cycles de fluctuations, elle a l'inconvénient de ne pas être quantitative. En plus, les ondelettes sont nombreuses et le choix de l'une parmi l'ensemble n'est pas toujours évident.

En ce qui concerne les pronostics de l'ensemble des méthodes testées, elles donnent toutes des indications similaires, c'est-à-dire pour notre bassin, une diminution des précipitations les trente ou quarante dernières années. La date de rupture diffère selon les méthodes à cause des outils utilisés. A notre avis, ces méthodes se complètent même si une préférence est exprimée en faveur du cumul de l'écart standardisé par rapport à la moyenne pour sa facilité d'utilisation en contre poids des informations qu'il génère.

L'étude de projection effectuée à l'aide du modèle ARIMA a été réalisée dans l'objectif d'examiner l'éventuelle tendance à moyen et court terme. Les résultats semblent indiquer une diminution des précipitations et une augmentation des températures dans l'avenir. Ce qui semble confirmer que la région subit les effets du changement climatique tel que les scientifiques le prédisent. Cette constatation a été confirmée par le calcul du SPI mensuel. En effet, si les graphiques de ce dernier indice indiquent des mois souvent déficitaires, les mois excédentaires sont moins nombreux et présentent des valeurs très élevées par rapport à la moyenne.

Références bibliographiques

Adjim H., (2004), « Evaluation et affectation des ressources hydriques de surface du bassin versant de la Tafna, approche pluviométrique », Mémoire de Magister, Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 163p.

Adjim H., Djedid A., (2008), « Impact of climate change on surface water resources in North West Algeria - Case of Béni Bahdel dam », The Fourth Environmental Symposium of German-Arab Scientific Forum for Environmental Studies, Fez (Marocco), October, 7 and 8, 2008.

Adjim H., Djedid A., (2014), « Sécheresse et mobilisation des eaux de surface dans un bassin transfrontalier, exemple du barrage Hammam Boughrara (N-O de l'Algérie) », 7th edition of the International Conference on Water Resources in the Mediterranean Basin - WATMED7, Marrakech (Maroc), 8-11 Octobre 2014.

Adjim H., Djedid A. (2018), « Drought and water mobilization in semi-arid zone: The example of Hammam boughrara dam (North-West of Algeria », Journal of Water and Land Development. N°37 p 3-10. DOI : 10.2478/jwld-2018-0019.

Adjim H., Djedid A., Bekkouche A., (2005), « Impact de la sécheresse 1974/1975-2001/2002 sur les apports du barrage Béni Bahdel (Nord-Ouest de l'Algérie) », 2^{ième} Congrès Méditerranéen « Ressources en eau dans le bassin méditerranéen – WATMED 2 », Marrakech (Maroc), 14 - 17 Novembre 2005.

Adjim H., Djedid A., Chettih M., (2012), « Variabilité climatique et sécheresse : Cas du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) », Colloque International « Eau et Climat, Regards croisés, Nord/Sud », Rouen (France), 25-26 Septembre 2012.

Adjim H., Djedid A. Hamma W. (2018), « Urbanism, Climate Change and Floods: Case of Tlemcen City In Algeria », Urbanism. Architecture. Constructions. Journal edited by NR&DI URBAN-INCERC; Vol. N°9, Issue N°1/2018, ISSN 2069-6469, pp.71-80.

Adjim H., Saci D., Djedid A., (2013), « Analyse des causes de l'échec de l'Aménagement Souani (Nord-Ouest de l'Algérie) », Actes du 2^{ième} Colloque international « Eau & Climat : Regards croisés Nord/Sud », Fès (Maroc), 27-28 novembre 2013, pp.243-248

Allègre C., Montvalon D., (2010), « L'imposture climatique ou la fausse écologie », Edition PLON, EAN : 9782259209854, 300p.

Anctil F., Pelletier G. (2011), « Analyse en ondelettes de fluctuation de débit en réseau de distribution d'eau potable », Revue sciences de l'eau 241 : 25-33, DCO : 10.7202/045825ar

Araujo Ideiao. S.M., Guimaraes Santos C.O. (2005), « Analysis of precipitation time series using the wavelet transform». Sociedade & Natureza, Uberlandia, special Issue, pp.736-745.

Ardoin-Bardin S., (2004), « Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne », Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 392p.

Baba Hamed K., (2006), « Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW Algérien) », Thèse de Doctorat, Université Abou bakr Belkaid Tlemcen, 160p.

Bahir M., Ouhamdouch S., Carreira P.M., (2016), « La ressource en eau au Maroc face aux changements climatiques; cas de la nappe Plio-Quaternaire du bassin synclinale d'Essaouira », Comunicações Geológicas (2016) 103, 1, 35-44 ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581X.

Bakreti A., Braud I., Leblois E., Benali A., (2013), « Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale) », Hydrological Sciences Journal, 58(1) 2013, ISSN: 0262-6667 (Print) 2150-3435 (Online), pp.133-151.

Balah B., Amarchi H., (2016), « Variabilité des séries pluviométriques du bassin versant de la Seybouse du Nord Est-Algérien », Revue Sciences & Technologie., Synthèse 32: 86 -97 (2016), pp.86-87

Banque Mondiale (2010), « Développement et changement climatique », Rapport sur le développement du monde, Banque Mondiale, Washington, ISBN : 978-2-7440-7460-8.

Barakat F., Handoufe A., (1997), « La sécheresse agricole au Maroc », Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty, Proceedings of the Rabat Symposium S1, April 1997. IAHS Pub. N°240, 1997.

Belala F., Hirche A., (2013), « Changements climatiques : tendance et variabilité pluviométrique dans quelques stations steppiques algériennes », 4th International Congress of the Populations & Animal Communities "Dynamics & Biodiversity of the terrestrial & aquatic Ecosystems, "CIPCA4", Taghit, Bechar, Algeria, 19-21 November 2013, pp.302-306

Benaouda H., Balaghi R., (2009), « Les changements climatiques : Impacts sur l'agriculture au Maroc », Symposium International "Agriculture Durable en Région Méditerranéennes" AGDUMED, Rabat, Maroc, 14-16 mai 2009, pp.42-47.

Ben Othman D., Ayadi I., Abida H., Laignel B., (2017), « Lien entre les changements climatiques et la variabilité du régime hydrologique en Tunisie semi-aride », Colloque « Ressources en Eau & Changement Climatique - Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau », Volume III : Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, Eau–Société–Climat'2017 (ESC-2017), Hammamet le 2-4 Octobre 2017, pp.243-249

Bessaoud O. (1994), « L'agriculture en Algérie : de l'autogestion à l'ajustement (1963-1992). In : Jouve A.M. (ed.). Crises et transitions des politiques agricoles en Méditerranée. Montpellier: CIHEAM, 1994. p.89-103 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 8)

Bogdan S D., (2010), « Les données climatiques instrumentales de Roumanie sont-elles susceptibles d'identifier un changement climatique ? », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg (France) et Université Babes-Bolyai, Cluj-Napoca (Roumanie), p.206

Bonnecase V., (2010), « Retour sur la famine au Sahel du début des années 1970 : la construction d'un savoir de crise », Politique africaine, N°119, Octobre 2010, pp.23-42.

Buchs A., (2007), « Les normes de l'eau comme objet d'instrumentalisation des politiques de l'eau : panorama et perspectives en Méditerranée ». Colloque « Gestion durable de l'eau en Méditerranée », Université Mentouri de Constantine, 19-20 mars 2007.

Buishand T.A., (1982), « Some methods for testing the homogeneity of rainfall records », Journal of hydrology, 58, pp.11-27.

Buishand T.A., (1984), « Tests for detecting a shift in the mean in hydrological time series », Journal of hydrology, 73, pp.51-61.

Camberlain P., (1993), « Sécheresse et variabilité pluviométrique en Ethiopie et dans la corne de l'Afrique : prolongements orientaux du Sahel ? », La Météorologie 8, série N°3 - Septembre 1993, ISSN : 2107-0830, pp.26-35.

Cannas B., Fanni A., Sias G., Tronci S., Zedda M.K., (2005), « River flow forecasting using neural networks and wavelets analysis », Géophysical Research Abstracts, Vol. 7, 08651, 2005.

Chevalier L., Laignel B., Massei N., Munier S., Becker M., Turki I., Coynel A., Cazenave A., (2013), « Hydrological variability of major French rivers over recent decades, assessed from gauging station and GRACE observations », *Hydrological Sciences Journal*, 59:10, 1844-1855, DOI: 10.1080/02626667.2013.866708

Chebil A., Laajimi A., Benaoun W., Gasmi A., (2009), « Etude de la vulnérabilité de l'agriculture tunisienne à la sécheresse : Cas de la céréaliculture », *Journal Algérien des Régions Arides* N° 08, 2009, ISSN 1112-3273, pp.61-72

Chebil A., Mtimet N., Tizaoui H., (2011), « Impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie) », *African Journal Of Agricultural And Resource Economics (AFJARE)*, Vol. 6 N° 2, 2011, pp.144-154

Chettih M., Mesbah M., (2008), « Modèle hybride neuro-multirésolution pour la prévision des débits », 8^{ième} Congrès Mondial de l'eau, 1-4 Septembre 2008, Montpellier, France.

Chourghal N., (2016), « Impacts des changements climatiques sur la culture du blé en Algérie », Thèse de Doctorat en Sciences, Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Alger, Algérie, p.173

Courtillet V., (2016), « La compréhension du changement climatique, de ses sources à sa modélisation : questions encore ouvertes ? », pp.45-66, Chapitre dans ouvrage collectif « Chimie et changement climatique », Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Danièle Olivier et Paul Rigny, Collection « Chimie et ... », Edition ECP Sciences, ISSN 978-2-7598-2035-1, 254 pages.

Damerval C., (2008), « Ondelettes pour la détection de caractéristiques en traitement d'images. Application à la détection de région d'intérêt », Thèse de Doctorat en Mathématiques, Université Joseph Fourier, Grenoble (France).

Daubechies I. (1992), « Ten Lectures on Wevelets », Livre Springer-Verlag, p.344.

Desbois D., (2005), « Une introduction à la méthodologie de Box et Jenkins : l'utilisation de modèles ARIMA avec SPSS », *Revue MODULAD*, n°33. 2005, pp1-24.

Dieppois B., Durand A., Fournier M., Massei N., Sebag D., Hassane B., (2010), « Variabilité des précipitations au sahel Central et Recherche du forçage climatique par analyse du signal : la station de Maïne-Soroa (SE Niger) entre 1950 et 2005. Rainfall variability in the Central Sahel and climate forcing by signal analysis: Maïne-Soroa station (SE Niger) over the period 1950-2005. Pangea, 2010, 47/48, pp.27-35.

Djedid, A., Bekkouche A, H. Adjim (1999), « Impact de la période de sécheresse 1977-1995 sur les ressources en eau de surface du bassin versant de la Tafna », Séminaire National sur les Ressources en Eau, Mascara, pp. 23-24.

Djedid A., Bekkouche A., Adjim H., (2001), « Sécheresse dans l'Ouest algérien et son impact sur les ressources en eau », Actes du séminaire sur l'Eau, l'Environnement et la Ville » publié par le Bulletin de l'Association de Géographie et de l'Aménagement du territoire, Fascicule N°9, Décembre 2001, ISSN : 1112-282X, Editions Dar El Gharb, pp.52-60.

Dorval A.F., (2011), « Mise au point de techniques de traitement de données en continu pour l'identification des composantes de débit à l'exutoire des bassins versants urbains : étude de cas des bassins versants Django Rheinhardt et Ecully ». Thèse de Doctorat INSA de Lyon. 253p.

Driouech F. (2010), « Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, p.130.

Edwards, P.N. (2012), « La complexité des données climatiques : étendue, traitement, controverses », Chapitre dans ouvrages collectif « Controverses climatiques : sciences et politique », publié par Zaccai E., Gemenne F., Decroly J.M., Paris : Presses de Sciences Po, 2012, ISBN 978-2-7246-1239-4

Elbouqdaoui K., Haida S., Aboulabbes O., Benaabidat L., Zahraoui M., Ozer A. (2006), « Evolution du régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc) », Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales, Tome 2, pp. 41-56.

El Garouani A., Tribak A., (2006), « Relation entre hydrologie et climat dans le bassin versant de l'Oued Inaouène (pré-Rif marocain) », Climate Variability and Change - Hydrological Impacts; Proceedings of the Fifth FRIEND; World Conference held at Havana, Cuba, November 2006, IAHS Publ. 308, 2006, pp.447-453.

El Jihad M.D., Peyrusaubes D., El Bouzidi A. (2014), « Sécheresses saisonnières et changement climatique dans le Gharb (Maroc) », Rur@lités, N°4 - 2014, Numéro spéciale, Revue électronique du laboratoire de Géographie « RURALITES » de l'Université de Poitiers, ISSN 2260-3727, pp.14-25.

- Fallot J.M. ; Bertini-Morini L., (2004)**, « Evolution des périodes de sécheresse et d'aridité au sud des Alpes suisses durant le 20^{ième} siècle », Colloque « Climat, mémoire du temps », Thème 2 : « Le Climat : son évolution et ses excès », Caen, France, 8-10 septembre 2004, pp.149-152
- Farge M., (1992)**, « Wavelet Transform and their applications to Turbulence », Annual Reviews. Fluid Mechanics, pp395-457.
- Fatmi. H., (2009)**, « Méthodologie d'analyse des signaux et caractérisation hydrologique », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, p.249
- Ferchichi A., (1996)**, « Etude climatique en Tunisie présaharienne », Revue Méditerranée, N°3/1996, pp.46-53
- Filahi S., Mouhir L., Tanarhte M., Trambly Y., (2015)**, « Tendance et variabilité des événements extrêmes au Maroc », 28^{ième} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015 (Belgique), pp.463-468.
- Gaillot P., (2000)**, « Ondelettes continues en Sciences de la Terre - méthodes et applications - Traitement du signal et de l'image », Université Paul Sabatier - Toulouse III, p.283
- GEIC, (2014)**, « Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité », Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation publié sous la direction de **Field C.B. et Barros V.R., Suisse, Octobre 2014, pp.32**
- GIEC, (2007)**, « Bilan 2007 des changements climatiques », Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A., GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Ghenim A.N., Megnounif A., (2013)**, « Spatial and temporal assessment of drought in northern Algeria », Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17 Istanbul, 5-7 November 2013
- Ghenim A.N., Megnounif A., Seddini A., Terfous A. (2010)**, « Fluctuations hydro-pluviométriques du bassin-versant de l'oued Tafna à Béni Bahdel (Nord-Ouest algérien) », Sécheresse vol. 21, n° 2, avril-mai-juin 2010, pp.115-120
- Hallouz F., Meddi M., Mahe G., (2013)**, « Modification du régime hydro-climatique dans le bassin de l'Oued Mina (nord-ouest d'Algérie) », Revue des sciences de l'eau, Volume 26, numéro 1, 2013, ISSN : 1718-8598, pp. 33-38

Hangnon H., De Longueville F., Ozer P., (2015), « Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé », 28^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, pp.497-502.

Hirche A., Boughani A., Salamani M., (2007), « Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes », Sécheresse 2007 ; 18 (4) : 314-320

Institut de Prospective Economique du monde Méditerranéen – IPEMED, (2009), « Eau et assainissement des villes et pays riverains de la Méditerranée », Rapport, réalisé sous la direction de Claude Martinand, 61p.

Institut Technique des Grandes Cultures-ITGC, (2015), Bulletin des grandes cultures, N°5, Mars 2015, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 12p.

Jaques G., Le Truet H., (2004), « Le changement climatique », COI-Forum Océans, Edition UNESCO, ISBN 92-3-203938-9, p.160.

Janin P., (2015), « Nouvelles analyses des crises alimentaires en Afrique de l'Ouest », Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, ISSN : 1370-6233 / eISSN : 1780-4507, 2015 19(3), pp.290-300.

Jawerth B., Sweldens W., (1993), « An Overview of Wavelet Based Multirésolution Analyses », AMS (MOS) classification: 42-02, 42C10.

Jouilil L., Bitar K., Salama H., Amraoui F., Mokssit A., Tahiri M., (2013), « Sécheresse météorologique au bassin hydraulique Oum Rbia durant les dernières décennies », Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, pp. 109-127

Keller J.C., Haldi P.A., (2011), « Les conséquences de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique, état de la connaissance scientifique à fin 2010 », World Engineers Convention, Genève, 4-9 septembre 2011.

Ketrouci K., Meddi M., (2003), « Étude de la variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie et ses répercussions sur la ressource en eau superficielle du bassin versant de la Tafna », Proceeding du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement (SIHE), 2013, Ouargla, Algérie, pp.500-503

Kettab A., (2001), « Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision », Desalination 136, 2001, pp.25–33

- Khaldi A., (2005)**, « Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'ouest Algérien (Monts de Tlemcen-Saida) », Thèse de Doctorat d'Etat en Hydrogéologie, Université D'Oran, Algérie, p.239
- Kingumbi A., (2006)**, « Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis (ENIT), Université de Tunis El Manar, Tunisie, p.189
- Koualdia W., (2015)**, « Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda Nord-Est Algérie », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, p.159
- Koualdia W., Djebbar Y., Hammar Y., (2014)**, Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien) », Revue Sciences & Technologie., Synthèse 29: 6-23, pp.6-23
- Kouamo O., (2011)**, « Analyse des séries chronologiques à mémoire longue dans le domaine des ondelettes », Thèse de Doctorat ParisTech, p.165
- Labat D., (2000)**, « Non linéarité et non stationnarité en hydrologie karstique », Thèse de doctorat. INP, Toulouse, p.220.
- Lienou G., (2007)**, « Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun », Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé, Cameroun, 405p.
- Lomborg B., (2001)**, « The skeptical environmentalist: Measuring the real state of the World », Cambridge University Press, ISBN 0 521 01068 3, 515p.
- Lovelock, J.E. (1979)**, « Gaia : A New Look at Life on Earth», Oxford et New York, Oxford University Press, 1979.
- Marko I., (2013)**, « Climat : 15 vérités qui dérangent », Edition TEXQUIS, Collection Texquis-Essais, EAB13 : 9782930650050, ISBN 978-2-930650-05-0, 263p.
- Meddi H., Meddi M., (2009)**, « Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie », Sécheresse 2009 ; 20 (1) : 57-65
- Meddi M., Talia A., Martin C., (2009)**, « Evolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie) », Revue "Physio-Géo", volume III – 2009, pp.61-84

Medjerab A., Henia L., (2011), « Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie Nord-occidentale », *Courrier du Savoir* - N°11, Mars 2011, ISSN : 1112-3338, pp.71-79.

Merlaud A., (2014), « Note de lecture – Climat : 15 vérités qui dérangent », 42p., <https://arxiv.org › physics>.

Meyer Y., Jaffard S., Rioul S., (1987), « Analyse par ondelettes », *Pour la science* N° 117 pp.28-37

Nalley D., Adamowski J., Khalil B., (2012), « Using discrete Wavelet transforms to analyze trends in Streamflow and precipitation in Quebec and Ontario (1954-2008) », *Journal of Hydrology*, 475 (2012), pp.204–228

Nolin A.W., Hall-McKim E.A., (2006), « Frequency Modes of Monsoon Precipitation in Arizona and New Mexico », *Monthly Weather Review*, Volume 134, pp.3774-3781

Norrand-Romand C., (2014), « Comptes rendus de lecture - Claude Allègre : L'imposture climatique ou la fausse écologie », *Revue « Géographie et aménagement »*, pp.127-128, ISSN 1950-5698.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture – FAO, (2011), « Les forêts et le changement climatique dans la région du Proche-Orient », Document de travail 9, Rome, 79p.

Organisation Météorologique Mondiale – OMM, (2011), « Guide des pratiques climatologiques », OMM N°100, UNESCO, Rapport de synthèse N°1119, ISBN 978-92-63-20100-3

Organisation Météorologique Mondiale – OMM, (2014), « Le climat dans le monde, 2001-2010 Une décennie d'extrême climatique », Organisation Météorologique Mondiale, UNESCO, Rapport de synthèse N°1119, ISBN 978-92-63-21119-4, 2013.

Panthou G (2014), « Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2013.

Partal T., (2012), « Wavelet analysis and multi-scale characteristics of the runoff and precipitation series of the Aegean region (Turkey) », *International journal of climatology*, N° 32(1), pp.108-120.

Patuere J.E., Servat E., Delatre O., Lubes-Niel H., (1998), « Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique », Hydrological Sciences Journal, N° 43(6), December 1998, pp.937-946.

Plan des Nations Unies pour le Développement – PNUD, (2009), « Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie », 19p.

Preure M., (1992), « L'économie mondiale des hydrocarbures et la stratégie d'un groupe pétrolier issu d'un pays producteur – Cas cités : SONATRACH (Algérie), KPC (Koweït), PEMEX (Mexique), PDVSA (Venezuela) », Thèse de Doctorat en Sciences économiques, Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs et Université de Bourgogne (France), Tome 1, 1992, p.320.

Remini B., Leduc C., Hallouche W., (2009), « Evolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens », Sécheresse 2009 ; 20 (1) : 96-103

Renard, B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. PhD thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 354p.

Rosat S., (2004), « Variations temporelles de la gravité en relation avec la dynamique interne de la terre », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg, 273p.

Rossi A., (2010), « Analyse spatio-temporelle de la variabilité hydrologique du bassin versant du Mississippi : rôle des fluctuations climatiques et déduction de l'impact des modifications du milieu physique », Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 329p.

Rouissat B., (2016), « Analyse systémique appliquée aux aménagements hydrauliques », Thèse de Doctorat en Hydraulique, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 266p.

Sang Y.F., (2013), « Improved continuous wavelet analysis of variation in the dominant period of hydrological time series », Hydrological sciences Journal, 58(1), pp.118-132.

Santos C.A.G., Freire P.K.M.M., (2012), « Analysis of precipitation time series of urban centers of Northeastern Brazil using Wavelet Transform», International Journal of Environment and Ecological Engineering. Vol.6, N° 7, pp.405-410.

Seguin B., Soussana J.F., (2008), « Emissions de gaz à effet de serre et changement climatique: causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage », Courrier de l'environnement de l'INRA n°55, février 2008, pp.79-91

Sene S., Ozer P., (2002), « Evolution pluviométrique et relation inondations - Evénements pluviaux au Sénégal », Bulletin de la Société géographique de Liège, N°42, 2002, 27-33.

Servat E., Paturel J.E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubes-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 », Wafer Resources Variability in Africa during the XXth Century, Proceedings of the bidjan'98 Conference held, Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998). IAHS Pub. N° 252,1998, pp.323-337

Sircoulon J., (1989), « Effets des sécheresses sur l'hydrologie de surface », La Houille Blanche, N°7-8 ; ISSN: 0018-6368 ; pp.505-516.

Smail N., (2014), « Suivi du comportement des barrages. Etude de cas », Thèse de Doctorat en Génie civil, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 300p.

Sleziak P., Hlavcova K., Szolgay J., (2015), « Advantage of times series analysis using wavelet transform as compared with Fourier analysis », Slovak Journal of Civil Engineering, V.23, 2015, N°2, 30-36.

Taibi S., Meddi M., Souag D., Mahe J., (2013), « Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009) », Climate and Land Surface Changes in Hydrology Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, IAHS Publ. 359, 2013, 192-197

Torrence C., Compo G.P., (1998), « A practical guide to wavelet analysis », Bulletin of the American Meteorological Society, V 79, N° 1, pp 61-78.

Touati B., (2010), « Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : Etat, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable », Thèse de Doctorat d'état en Aménagement du territoire, Département de l'Aménagement du territoire, Faculté des Sciences de la terre, de la Géographie et de l'Aménagement du territoire, Université Mentouri, Constantine, 385p.

Touati S., Hermassi T., Hamadi Habaieb H., (2017), « Persistance de la sécheresse en Tunisie », Colloque « Ressources en Eau & Changement Climatique - Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau », Volume III : Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, Eau–Société–Climat'2017 (ESC-2017), Hammamet le 2-4 Octobre 2017, pp.226-232.

Truche C., (2010), « Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain », Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 228p.

Truchetet F., (1998), « Ondelettes pour le signal numérique », Edition Hermes, Paris, 158p.

Uekötter F., (2011), « Am Ende der Gewissheiten Die ökologische Frage im 21. Jahrhundert», Campus Verlag, Frankfurt am Main 2011, ISBN 9783593395333

UNESCO. (2014). « Le changement climatique en Afrique. Guide à l'intention des journalistes », Série de l'UNESCO sur la formation au journalisme Shanahan, rédigé par M, Shubert, W, Scherer. C, & Corcoran. T, Coordonné par Banda. F, ISBN 978-92-3-002234-1.

Venkata-Ramana R., Krishna B., Kumar S. R., Pandey N. G., (2013), « Monthly Rainfall Prediction Using Wavelet Neural Network Analysis », Water Resources Management, August 2013, Volume 27, Issue 10, pp.3697–3711

Wang, D., H. Ding, V. P. Singh, X. Shang, D. Liu, Y. Wang, X. Zeng, J. Wu, L. Wang, and X. Zou (2015), « A hybrid wavelet analysis–cloud model data-extending approach formeteorologic and hydrologic time series », J. Geophys. Res. Atmos., 120, 4057–4071.

World Meteorological Organization – WMO, (2010), « Guide to Agricultural Meteorological Practices », WMO-N°134, ISBN 978-92-63-10134-1, 2010 edition.

Yao A.B., Goulai B.T.A., Kouadiou Z.A., Kouakou K.O., Kane A., Sambou S., (2012), « Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Cote d'Ivoire », Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, 19 (2012) 136 - 157 ISSN 1813-3290