

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Eau, Environnement et Développement durable



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière: Science Agronomique

Spécialité : Sciences de l'Eau et Environnement

Par

Kenza ACHOUR

Thème :

PREVISION DE LA SECHERESSE AU NIVEAU DE SEPT PLAINES DU NORD OUEST ALGERIEN

Soutenue le 05/04/2021, devant le jury composé de :

Abdelkader BOUTHIBA	Professeur	Université de Chlef	Président
Mohamed MEDDI	Professeur	ENSH Blida	Rapporteur
Adda ABABOU	Professeur	Université de Chlef	Examineur
Saci NEDJAI	MCA	Université de Chlef	Examineur
Abdelhadi AMMARI	MCA	ENSH Blida	Examineur
Abdelkader BOUDERBALA	MCA	Université de Khemis Miliana	Examineur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, mon Marie Bouabdellah

Mes enfants: Haithem , Hadil

Mes frères et mes soeurs

Mes beaux parents et mes amies.

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

.....

Remerciements

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

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

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur ZEROUAL Ayoub, enseignant à l'école supérieure de l'hydraulique ENSH, Blida, pour ses conseils et pour l'attention soutenue qu'il m'a manifesté par ces encouragements et sa compréhension.

Mes grands remerciements à Monsieur MORAMARCO Tommaso, co-directeur à l'Institut de recherche pour la protection géo-hydrologique (IRPI), Italie, pour m'avoir accueilli dans l'unité de recherche (IRPI) et de m'avoir permis de travailler dans d'aussi bonnes conditions et pour son aide et ces conseils précieux.

Je tiens à remercier aussi M ELLE BOUABDELLI Senna et madame Pamela MACCIONI pour leur participation dans ce travail.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Mes remerciements vont également aux personnels de l'Agence National des Ressources Hydriques « ANRH » (Blida et Alger), et office nationale de métrologie « ONM » (Dar el Beidha) pour toutes leurs aides.

Merci à vous tous

ملخص

استمرار وشدة الجفاف في الجزائر له تأثير اقتصادي كبير . لأكثر من خمسة عقود، تم تسجيل عجز كبير في هطول الأمطار في جميع أنحاء البلاد. هذه الظاهرة لها تأثير مباشر على الأنشطة الزراعية بسبب عدم هطول الأمطار في وقت نمو النبات. بمأن نظام الجريان يرتبط ارتباطاً وثيقاً بهطول الأمطار، أذن الجفاف يؤثر على مستوى سدود السدود.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الجفاف على مستوى السهول السبعة لشمال غرب الجزائر خلال الفترة (1960-2010) بمقاييس زمنية مختلفة. استند هذا العمل إلى أدوات تقييم الجفاف مثل SPI ومؤشر الهطول القياسي ومؤشر China-Z (CZI) و المعدل (MCZI) و Dourg Hazard (DHI) ، وكذلك نماذج التنبؤ بالجفاف مثل سلسلة ماركوف والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) تم إجراء تحليل زمني للجفاف للكشف عن الكسر والاتجاه في سلسلة SPI بمقاييس زمنية مختلفة (3 و 6 و 9 و 12 شهراً) باستخدام طريقة Pettit و Makndall على التوالي.

أظهر تطبيق سلسلة ماركوف في منطقة الدراسة أن الجفاف ظاهرة متكررة ومتكررة إلى حد ما لمدة عام أو عامين متتاليين أو حتى ثلاث سنوات. وفقاً للسلسلة SPI، فإن احتمال وجود سنتين وثلاث سنوات جافة متتالية أكبر في السهول الغربية.

تمت معالجة التنبؤ بالجفاف مع خطوة زمنية لمدة شهرين باستخدام نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)، بناءً على قيم SPI في نطاقات زمنية مختلفة. تتأثر السهول السبعة في شمال غرب الجزائر بشدة بالجفاف، على عكس الجزء الشرقي من البلاد، حيث تتضاءل ظاهرة الجفاف من حيث المدة والشدة. يظهر التحليل أيضاً أن وتيرة الجفاف تتغير وفقاً للجدول الزمني.

بالإضافة إلى ذلك، يصف التحليل الزمني، دون مراعاة تأثير الارتباط التلقائي على نقطة التغيير والاتجاهات الرتيبة لسلسلة SPI ، وجود اتجاه سلبي مع التزامن غير المتزامن عند نقطة التغيير.

ومع ذلك، يصبح هذا أقل أهمية في المقاييس الزمنية لمدة 3 و 6 أشهر إذا تم تصميم السلاسل الزمنية باستخدام نهج تصحيح الاتجاه غير المتحيز قبل تصحيحه. فيما يتعلق بالتنبؤ بالجفاف القائم الشبكة العصبية الصناعية في السهول السبعة مع خطوة زمنية مدتها شهرين، فإن هندسة شبكات الإدراك الحسي متعدد الطبقات مع خوارزمية معايرة ليفنبرغ-ماركوارت تعطي نتائج مرضية مع معامل التصميم المعدل (Radj 2) أكبر من 0.81 وخطأ الجذر التربيعي (RMSE) والخطأ المطلق المتوسط (EMA) أقل من 0.41 و 0.23 على التوالي.

الكلمات الرئيسية (NIBP): مؤشر China-Z (CZI)، مؤشر CZI المعدل (MCZI) ومؤشر (DHI) Dourg Hazard، سلسلة Markov، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، Pettit و Makndall، الارتباط التلقائي، حواجز شبكية متعددة الطبقات، ليفنبرغ - ماركوارت.

Résumé :

La persistance et la sévérité de la sécheresse en Algérie a un impact économique important. Depuis plus de cinq décennies un important déficit pluviométrique a été enregistré dans l'ensemble du pays. Ce phénomène a des incidences directes sur les activités agricoles dues à l'absence des précipitations au moment de la croissance des plantes. Le régime des cours d'eau étant en relation étroite avec les précipitations, la sécheresse se répercute sur le niveau de remplissage des barrages.

Ce travail a pour but de caractériser et identifier la sécheresse dans les sept plaines du Nord-Ouest d'Algérie durant la période (1960-2010) à différentes échelles de temps. Il a été basé sur des outils d'évaluation de la sécheresse tels que les indices de sécheresse (SPI, Standardized precipitation index, Percent of Normal Index (PNI), China-Z Index (CZI), Modified CZI (MCZI) et Drought Hazard Index (DHI)), ainsi que sur les modèles de prévision de la sécheresse tels que la chaîne de Markov et les réseaux de neurone artificiels (RNA).

Une analyse temporelle de la sécheresse a été faite pour détecter la rupture et la tendance dans les séries du SPI à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois) par l'utilisation du test de Pettit et celui de Makdall.

L'application de la chaîne de Markov dans la zone d'étude a montré que la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent d'une année, deux années de suite, voire trois années. Selon les séries du SPI, la probabilité d'avoir deux et trois années sèches consécutives est plus importante dans les plaines d'Ouest occidentale.

La prévision de sécheresse avec un pas de temps de deux mois a été traitée en utilisant un modèle de réseau neuronal artificiel (RNA), basé sur les valeurs du SPI à différentes échelles de temps. Les sept plaines du nord-ouest de l'Algérie sont gravement touchées par la sécheresse, à l'inverse de la partie orientale du pays, où le phénomène de sécheresse est moindre à la fois en durée et en sévérité. L'analyse montre également que la fréquence de la sécheresse change en fonction de l'échelle de temps.

De plus, l'analyse temporelle, sans tenir compte de l'effet d'autocorrélation sur le point de changement et les tendances monotones de la série SPI décrit une tendance négative avec une synchronisation asynchrone au point de changement. Cependant, cela devient moins important aux échelles de temps de 3 et 6 mois si les séries chronologiques sont modélisées en utilisant l'approche trend-free-pre-whitening corrigée et non biaisée. Concernant la prévision de sécheresse basée sur l'RNA dans les sept plaines avec un pas de temps de deux mois,

l'architecture des réseaux perceptron multicouches avec l'algorithme d'étalonnage Levenberg-Marquardt, donne des résultats satisfaisants avec le coefficient de détermination ajusté (R_{adj}^2) supérieure à 0,81 et une erreur racine-moyenne-carré (RMSE) et absolue moyenne (EMA) inférieures à 0,41 et 0,23, respectivement.

Mots clés : Indice de Pourcentage (PNI) ; Modifié CZI (MCZI); Indice de danger de sécheresse (DHI) ; chaîne de Markov; réseaux de neurone artificiels (RNA) ; test de Pettit ; test de Makndall ; réseaux perceptron multicouches ; Levenberg-Marquardt .

Abstract :

The persistence and severity of the drought in Algeria has a significant economic impact. For more than a five decade, a large rainfall deficit has been recorded throughout the country. This phenomenon has a direct impact on agricultural activities due to the absence of rainfall during the plant growth. The river regime being closely related to rainfall, the drought affects the level of dams filling.

This study aims to characterize and identify drought In the seven plains of the North-West of Algeria during the period (1960-2010) at different time scales. This work was based on drought assessment tools such as SPI, Standardized Precipitation Index, China-Z Index (CZI), Modified CZI (MCZI) and Dourgt Hazard. Index (DHI)), as well as drought prediction models :Markov chain and Artificial Neural Networks (ANN).

A temporal analysis of the drought was made to detect the break and trend in the SPI series at different time scales (3, 6, 9 and 12 months) by the Pettit and Makndalltest respectively.

The application of the Markov chain in the study area has shown that drought is a fairly frequent and recurring phenomenon of one year, two years, or even three years. According to SPI series, the probability of having two and three consecutive dry years is greater in the western plains.

Drought prediction with two months lead-time is addressed by using the artificial neural network (ANN) model, based on SPI values at different timescales. The seven plains of North-western of Algeria are severely affected by drought, compared to the Eastern part of the country, wherein drought phenomena are decreased in both duration and severity. The analysis also shows that the drought frequency changes according to the time scale. Moreover, the temporal analysis, without considering the autocorrelation effect on change point and monotonic trends of SPI series, represents a negative trend with asynchronous in change-point timing. However, this becomes less significant at 3 and 6-months' time scales if time series are

modeled using the corrected and unbiased trend-free-pre-whitening approach. As regards the ANN-based drought forecast in the seven plains with two-months of lead time, the multi-layer perceptron networks architecture with Levenberg-Marquardt calibration algorithm provides satisfactory results with the Adjusted Coefficient of Determination (R_{adj}^2) higher than 0.81 and the Root-Mean-Square-Error (RMSE) and the Mean Absolute Error (MAE) less than 0.41 and 0.23, respectively.

Keywords: percent of normal index (PNI), China-Z Index (CZI), Modified CZI (MCZI) and Drought Hazard Index (DHI), Markov chain, Artificial Neural Networks (ANN), Pettit, Makindall, multilayer perceptron, Levenberg-Marquardt.

...Sommaire

Introduction générale :.....	01
Chapitre I : Etude bibliographique	
1) Introduction:.....	05
2) Le climat et le temps:	05
3) Le systemclimatique:	05
4) Changement climatique:	06
5) Sécheresse:	08
5.1) Définition de la sécheresse :	10
5-2) Sècheresse en Algérie :.....	10
6) Quelques travaux et recherches effectues en sécheresse dans le monde:.....	13
6. 1) En Europe.....	13
6. 2) En Amérique.....	14
6.3) En Asie.....	15
6.4) En afrique.....	16
6.5) Au Maghreb.....	17
5.6) En Algérie.....	19
7) conclusion :.....	20
Chapitre II: Matériels et méthodes	
1) Présentation de la zone d'étude :.....	21
2) Description de la base dedonnée.....	23
3) Méthodes:.....	25
3.1) Outils d'évaluation de la sécheresse:.....	25
3.1-1) Indices de sévérité de la sécheresse:	25
a. Indice de précipitation standardisé (SPI):.....	25
b. Pourcentage de l'indice normale (PNI):.....	30
c. L'indice de la Chine-Z (CZI):.....	31
• Autre indice:.....	30
a. Indice de sévérité de sécheresse de Palmer:.....	30
b. Indice d'alimentation des eaux de surface (SWSI):.....	31
c. Indice de l'écart à la normale (En):.....	32
d. statistique Z-SCORE: the statistical Z-SCORE:.....	32
e. Indice de nombre d'écart type : Standard deviation index (SDI) :	32

f. Déciles :.....	32
g. Méthode d'intervalle de confiance (IC) Confidence interval method :.....	33
i. Indice de pluviosité (Ip) :.....	34
j. Analyse fréquentielle :.....	34
3.2) Techniques de prévision de sécheresse :.....	35
3.2-1) Chaîne de Markov :.....	35
a. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 1 :.....	35
b. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 2 :.....	36
3.2-2) Les réseau de neurones artificiel (RNN) :.....	36

Chapitre III: Etude d'homogénéité des données

1)Introduction :.....	46
2) Contrôle et vérification des données :.....	46
2.1) Contrôle des données par l'homogénéisation des séries des précipitations :.....	46
2.1.a) Comblement des lacunes à l'aide du programme "Bouche trous" :.....	47
2.1.b) Homogénéisation des données des précipitations par la Méthode du double cumul	47
2.2) Choix des stations représentatives pour les plaines étudiées :	48
2.2.a) La méthode des polygones de Thiessen :.....	48
2.3) Evaluation de l'ajustement de la loi :.....	49
2.3.a) La statistique d'Anderson-Darling :.....	49
2.3.b) Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine-normale :.....	50
3) conclusion :.....	52

Chapitre IV : Etude de la variabilité climatique dans les sept plaines

1) Inrtoductuon :.....	53
2) Caractérisation du climat :.....	53
2.1) Diagramme ombrothermique:.....	53
2.2) Indice de De Martonne:.....	54
2.3) Indice de Paul Moral:.....	55
3) Analyse de temperature:.....	55
3.1) Analyse statistiques des températures :.....	56
4) Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie:.....	59
4.1) L'analyse temporelle:.....	59
4.2) Analyse de la variabilité de la pluviométrie :.....	59
5) conclusion :.....	73

Chapitre V: Caractérisation de la sécheresse à l'aide des indices de sécheresse

1)Introduction:	74
2) Indice de sécheresse standardisé (standardized precipitation index SPI) :	74
2.1) Variabilité spatial et temporelle du SPI à différentes échelles de temps :	74
2.1-a) Variabilité spatial du SPI à différentes échelle de temps:	74
2.1-b) Variabilité temporelle du SPI à différentes échelles:	81
3) Indice de risque de sécheresse (Drought Hazard Index DHI):	92
3.1) La variation spatial de la sécheresse par le DHI:	92
4) China-Z index (CZI):	94
5) Modified CZI (MCZI):	95
6) Comparaison entre CZI et SPI:	95
7) Comparaison entre SPI et MCZI:	98
8) Pourcentage de l'indice normal. Percent of normal index (PNI):	101
9) Paramètres descriptifs des séquences de sécheresse:	101
10) Conclusion :	106

Chapitre VI: Etude de la persistance de la sécheresse dans les sept plaines à l'aide de la Chaîne de Markov

1)Introduction:	108
2) Test de normalité:	108
3) Méthodes des quintiles:	108
4) Application la chaîne de Markov ordre 1 et 2 en utilisant le SPI :	109
4.1) Application de la chaîne de Markov d'ordre 1:	109
4.1.a) A l'échelle annuelle (SPI 12 mois):	109
4.1.b) A l'échelle saisonnière:	110
4.2) Application de la chaîne de Markov d'ordre 2:	113
4.2-a) A l'échelle annuelle (SPI 12 mois):	113
4.2-b) A l'échelle saisonnière:	114
5) Conclusion :	116

Chapitre VII: Application de réseau de neurone pour la prédiction de la sécheresse dans les sept plaines

1)Introduction :	118
2) Principe:	118
3) Préparation des données d'entrée et de sortie:	119
4) Critères de performance du modèle:	120
5) Résultats :	121

6) Discussion:.....	124
7) Conclusion :.....	125
Conclusion générale:.....	126
References bibliographique	

Liste des figures :

Figure 01 : Localisation géographique des sept plaines de la région d'étude

Figure 2 : réseau de neurones monocouche

Figure 03 : Réseau multicouche classique

Figure 4 : Réseau à connexion locale

Figure 05 : Réseau à connexions récurrentes

Figure 06 : réseau a apprentissage supervisé

Figure 07 : réseau a apprentissage non supervisé

Figure 08 : l'application de la méthode des polygones de Thiessen sur les plaines de la région d'étude

Figure 09: les courbes d'ajustement de loi de racine-normal sur les données de précipitation pour les sept plaines.

Figure 10 : Courbe ombrothermique de la plaine de Mitidja.

Figure 11: évolution des températures annuelles (1960-2010)

Figure 12: Tendence des températures annuelles par régression linéaire

Figure 13: Evolution chronologique de la pluviométrie annuelle dans les seps plaines durant la période (c)

Figure 14 :évolution intra-annuelle de la pluviométrie pour les sept plaines

Figure 15 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Mitidja.

Figure 16 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Haut Cheliff.

Figure 17 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Moyen Cheliff.

Figure 18 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Ghriss.

Figure 19 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Sidi bel abbes.

Figure 20 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Maghnia.

Figure 21 : Cartographie de SPI à différentes échelles de temps pour cinq périodes 65, 75,85, 93 et 2005.

Figure 22 : comparaison des SPIs à différentes échelles de temps pour les sept plaines (1960-2010)

Figure 23 : Occurrence de la sécheresse de 1960 à 2010 dans les sept plaines selon SPI à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois).

Figure 24 : Coefficients d'autocorrélation Lag-1 ($\hat{\rho}$) pour la série SPI dans les sept plaines (1960-2010) à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois)

Figure 25 : Les Z scores issus de la méthode MMK pour les séries SPI dans les sept plaines (1960-2010) à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois). Les deux lignes rouges représentent les valeurs théoriques critiques n du test MMK à 5% niveau de probabilité.

Figure 26 : la présentation graphique par histogrammes de l'Indice de risque de sécheresse (DHI) pour les sept plaines de la région d'étude

Figure 27 : la variation spatiale de DHI dans les sept plaines

Figure 28: Diagramme de dispersion pour le SPI et le CZI pour les sept plaines de 1960 à 2010.

Figure 29: Diagramme de dispersion pour le SPI et le MCZI pour les sept plaines de 1960 à 2010.

Figure 30 : fréquences des Pourcentage de l'indice normal pour les sept plaines

Figure 31: Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1960-2010 à court, moyen et long termes aux seps plaines.

Figure 32 : Schématisation des données d'entrée et de sortie avec un délai de 2 mois avec une architecture 3-3-1 ANN (exemple de SPI 3 mois) (SPI-3JFM est l'indice normalisé de précipitation à 3 mois des mois de janvier, février et mars)

Figure 33 : Cartographie des valeurs de SPI observées et prédites pour les sept plaines étudiées (1960-2010) pour SPI à différentes échelles de temps (ligne de couleur rouge: médiane, boîte: premier et troisième quartiles, moustaches: intervalle de confiance à 99%, + marqueur: valeur aberrante).

Figure 34: Comparaison des SPIs 12 observés et prévus au cours de la phase de validation pour les sept plaines étudiées.

Liste des tableaux

Tableau 01: Les stations pluviométriques retenues pour l'étude.

Tableau N° 02 : Classification de la sévérité de la sécheresse

Tableau 03 : classification du Pourcentage de l'indice normale. Percent of normal index(PNI) :

Tableau 04 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon PDSI

Tableau N° 05 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon le SDI

Tableau 06 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon les déciles

Tableau 07 : Méthode d'intervalle de confiance.

Tableau 08: Classes de sécheresse en fonction des fréquences

Tableau 09: Classification de la sécheresse suivant les déciles

Tableau 10 : les caractéristiques statistiques de la Moyenne annuelles pour les plaines étudiée

Tableau 11 : comparaison entre les valeurs de test d'Anderson-Darling

Tableau 12 : la classification de climat selon l'indice Maratone pour les sept plaines

Tableau 13 : la classification de climat selon l'indice de Paul Moral pour les sept plaines

Tableau 14 : paramètres statistiques des températures

Tableau 15: Caractéristiques descriptives des séries d'observation à l'échelle annuelle:

Tableau 16 : Analyses des moyennes d'Automne, hivernales et printanières sur les deux périodes (1980-1989) et (1990-2000).

Tableau 17 : Point de changement des valeurs moyennes des séries SPI par le test de Pettitt original et modifié en utilisant TFPWcu pour la période 1960-2010 à un niveau de signification de 5%.

Tableau 18 : les caractéristiques descriptif de la sécheresse selon les SPIs à différentes échelles de temps pour les sept plaines.

Tableau 19: résultats des tests de normalités appliqués aux séries pluviométriques annuelles

Tableau 21 : Processus de Markov d'ordre 1 pour SPI 12 mois

Tableau 22 : Processus de Markov d'ordre 1 pour SPI 3 mois

Tableau 23 : Processus de Markov d'ordre 1 pour SPI 3 mois (Hiver)

Tableau 24 : Processus de Markov d'ordre 1 pour SPI 3 mois (Printemps)

Tableau 25 : Processus de Markov d'ordre 2 pour SPI 12 mois

Tableau 26: Processus de Markov d'ordre 2 pour SPI 3 mois (Automne)

Tableau 27 : Processus de Markov d'ordre 2 pour SPI 3 mois (Hiver)

Tableau 28 : Processus de Markov d'ordre 2 pour SPI 3 mois (Printemps)

Tableau 291. Structures des modèles de prévision de la sécheresse.

Tableau 30 : Mesures statistiques sur la performance de l'ANN pour un délai de deux mois dans les sept plaines à différentes échelles de temps.

Introduction générale

◆ **Introduction générale :**

Environ 50% des zones les plus peuplées du monde sont extrêmement vulnérables à la sécheresse (**Augusto et al., 2009**). En 1967 et 1992, la sécheresse affectée 50% des 2,8 milliards de personnes touchées par les catastrophes naturelles. En fonction des impacts directs et indirects de ce phénomène, 1,3 millions de vies humaines ont été perdues, sur un total de 3,5 millions de personnes qui sont décédées suite à des catastrophes naturelles (**Augusto et al., 2009**).

Le Maghreb est une région où le climat est dominé par l'aridité et où la pluviométrie annuelle moyenne est faible et fluctuante. Il a connu, au cours du dernier siècle, plusieurs épisodes de sécheresse persistante parfois sur plusieurs années, avec des retombées économiques non négligeables. L'insuffisance d'eau affecte d'abord le secteur agricole, qui dépend directement de la pluviométrie, et occupe une superficie importante au Maghreb. Les populations, surtout rurales, sont souvent les premières à trouver des difficultés à satisfaire leurs besoins en eau potable, et à nourrir leur famille et leur bétail, les sécheresses entraînant en général une augmentation des prix des produits agricoles (**OSS 2013**).

Au cours des cinquante dernières années, l'Algérie a connu l'une des plus grandes fluctuations du régime pluviométrique. Les fluctuations climatiques ont non seulement affecté les régimes pluviométriques, mais elles ont également créé des conditions de sécheresse persistantes et omniprésentes (**Meddi et al., 2010**). Les événements varient d'une région à l'autre et la vulnérabilité de la partie nord-ouest du pays aux sécheresses est évidente. (**Meddi et al., 2010 ; Hallouz et al., 2015**). L'étendue spatiale et l'intensité de ce phénomène dans cette zone ont causé d'énormes pertes économiques, car la forte dépendance économique du pays à l'agriculture pluviale dans les grandes plaines de cette région (**Meddi et al., 2010 ; Habibi et al., 2017 ; Hallouz et al., 2015**).

Historiquement, l'Algérie a connu plusieurs sécheresses affectant différemment le nord de l'Algérie (**Meddi et al., 2010 ; Zeroual et al., 2019**). La durée et la gravité de ce déficit varient dans le nord-ouest du pays, ce qui a de graves répercussions sur les caractéristiques agricoles et socio-économiques de la forte dépendance de l'économie du pays vis-à-vis de l'agriculture pluviale sur les vastes terres fertiles (**Meddi & Meddi 2009**). Pour la période 1970-2013, la diminution continue des précipitations, dans des zones précédemment considérées comme un climat tempéré a provoqué des conditions d'environnement très sèches (**Meddi et al., 2010 ; Zeroual et al., 2017**), les niveaux des réservoirs ayant chuté jusqu'à 25%

de leur niveau normal, le niveau et les niveaux piézométriques ont diminué en dessous de 40 mètres pour certains aquifères (**Demmak, 2008**). Cette réduction a des impacts négatifs sur l'approvisionnement en eau de tous les secteurs. De plus, les scénarios climatiques futurs à l'horizon 2100 basés sur des modèles climatiques régionaux (MCR) montrent que cette région est plus vulnérable que le centre et l'est de l'Algérie (**Zeroual et al., 2019**). Par conséquent, pour les plaines du nord-ouest Algérien, les pratiques de gestion durable de l'eau constituent un défi majeur (**Medjerab et Henia, 2005**).

Contrairement à tous les autres phénomènes climatiques extrêmes, les sécheresses sont un phénomène naturel qui se développe lentement dans le temps, où ses conséquences prennent beaucoup plus de temps avant d'être remarquées par le secteur socio-économique (**Cancelliere et al., 2006**). Pour cette raison, la prévision de la sécheresse est un outil d'atténuation efficace pour évaluer ses conséquences néfastes sur les ressources en eau et l'agriculture et mettre en œuvre des plans de suivi appropriés.

Actuellement, le suivi et l'évaluation des conditions de sécheresse dans les différentes parties du monde reposent essentiellement sur des indices de sécheresse permettant, d'une part, de déterminer scientifiquement le seuil de sécheresse à différentes échelles temporelles et d'autre part, la définition des classes de sécheresse, cet événement selon la gravité et la localisation (**Mckee et al., 1993 ; Byun, .,and Kim, (2010) ; Chandramouli et al., 2017 ; Eyshirezaei 2011 ; Hong Wu et al (2011) ; Maccioni et al., 2015**).

Parmi les indices les plus couramment utilisés pour la surveillance des sécheresses, l'Indice des Précipitations Standardisées (SPI) (**Mckee et al., 1993**) est celui qui est souvent présent dans la littérature. Son calcul permet de comparer les années sèches et humides ou les années déficitaires ou excédentaires. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a adopté cet indice depuis 2009, en tant qu'outil mondial, pour mesurer la sécheresse météorologique, dans la «Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse».

Puisque l'indice est standardisé, il est possible de l'utiliser de la même manière dans les climats humides ainsi que dans les climats arides. Cet indice a été utilisé par de nombreux auteurs dans de nombreuses régions du monde dans le cadre de la surveillance de la sécheresse météorologique (**Byun and Kim 2010, Zhang et al., 2012 et Chandramouli et al., 2017 ; Faye et al., 2019**). Ignorés dans le calcul de cet indice, plusieurs auteurs ont recommandé de l'utiliser comme indice de sécheresse primaire en raison de sa simplicité, de l'invariance spatiale dans l'interprétation (**Guttman 1998, Vicente-Serrano et al., 2010, Daki**

et al., 2016 et Habibi et al., 2018) et de leur capacité à capturer et répliquer les événements de sécheresse mesurés par d'autres indices (**Byun and Kim 2010, Maccioni et al., 2015**). **Maccioni et al. (2015)** ont montré que la caractérisation de la sécheresse par le SPI dans le bassin du Tibre centrale en Italie peut être considérée comme représentative des indices basés sur l'évapotranspiration et les précipitations avec un comportement temporel similaire à différentes échelles de temps.

Dai et al. (2004) ont montré que la sécheresse avait augmenté dans le nord-ouest de l'Algérie au cours de la période 1950-2002 sur la base d'une équation d'équilibre sol-eau. Cette tendance est due à l'effet combiné de l'évolution des précipitations et de la température. La diminution continue des précipitations et l'augmentation de la température (**Zeroual et al., 2017**) observée dans cette région depuis 40 ans ont créées dans des zones auparavant considérées comme méditerranéennes, des conditions d'environnements secs. Cette sécheresse continue qui a des conséquences négatives sur les ressources en eau, affecte de manière significative les rendements agricoles du pays.

La sécheresse est identifiée à partir des SPI à différentes échelles de temps de 3, 6, 9 et 12 mois. L'analyse statistique d'une série chronologique des indices SPI aux différentes échelles temporelles des sept plaines de la période (1960-2010) permettra d'étudier la variabilité spatio-temporelle de cette sécheresse sur le long terme.

De plus, la répartition géographique du phénomène de sécheresse en Algérie et sa sévérité ont conduit certains auteurs à utiliser le terme «saut de climat» (**Meddi et al., 2010**). D'autres ont étudié les causes climatiques potentielles de la sécheresse à travers l'analyse des séries de précipitations (**Bekkoussa et al 2008, Medjerab et Henia 2005**). Cependant, la prédiction pourrait jouer un rôle important dans la minimisation de ces impacts, en particulier dans les conditions de pénurie des ressources en eau que l'Algérie a subie au cours des dernières décennies.

Les modèles statistiques sont utilisés depuis plus de 50 ans pour la prévision de la sécheresse, tels que ceux proposés par **Gabriel et Neumann (1962)** utilisant la chaîne de Markov, la méthode de régression de **Torranin (1973)** et utilisant des modèles stochastiques linéaires incluant la moyenne mobile intégrée autorégressive (ARIMA) et la moyenne mobile intégrée autorégressive saisonnière (SARIMA) de Mishra et Desai (2005).

Cependant, au cours des deux dernières décennies, l'application du réseau neuronal artificiel (RNA) en hydrologie s'est considérablement améliorée, notamment à des fins de prévision (**Thirumalaiah et Deo 1998, 2000, Tokar et Markus 2000 Coulibaly et al., 2001 ;Jianjin et al., 2017 ; Xuan-Hien et al., 2019**). RNA est généralement utilisé pour la gestion et la mesure des différents aspects des ressources en eau, y compris la prévision des ouragans (**Marzban et Stumpf 1996**), la prédiction de perte de sol dans les oueds (**Salhi et al., 2013**) et les prévisions d'évaporation (**Wang et al., 2015**). En particulier, l'adoption de cette technique pour la prévision de la sécheresse a ajouté une nouvelle dimension à la planification et à la gestion des ressources en eau (**Mishra et Desai 2006 , Mar et Naing 2008,Barua et al 2012,**). Comparées aux résultats obtenus par les techniques classiques de modélisation de la sécheresse dans les régions arides (**Kim et Valdés 2003b,Bari Abarghouei et al 2011, Le et al., 2017**).

Par conséquent, sur la base de la meilleure capacité susmentionnée des RNA dans la prévision de la sécheresse par rapport aux autres approches, cette méthode sera utilisée dans ce travail pour prévoir les conditions de sécheresse deux mois à l'avance. Considérant les avantages indiqués ci-dessus pour le SPI, la prévision de la sécheresse par RNA sera réalisée en utilisant cet indice. A cet effet, l'indice de précipitation standardisé (SPI) sera calculé sur des périodes de 3, 6, 9 et 12 mois, pour une période de 51 ans de 1960 à 2010 dans sept plaines du Nord-Ouest de l'Algérie.

La thèse est composée de sept chapitres répartis comme suit :

- Chapitres 01: Etude bibliographique ;
- Chapitres 02 : Matériels et méthodes ;
- Chapitres 03 : Etude d'homogénéité des données ;
- Chapitres 04 : Etude de la variabilité climatique dans les sept plaines ;
- Chapitres 05 : Caractérisation de la sécheresse à l'aide des indices de sécheresse ;
- Chapitres 06 : Etude de la persistance de la sécheresse dans les sept plaines à l'aide de la Chaîne de Markov ;
- Chapitres 07: Application de réseau de neurone pour la prédiction de la sécheresse dans les sept plaines.

Chapitre I
Etude bibliographique

1) **Introduction** :

La sécheresse est définie comme étant une période prolongée de précipitations insuffisantes sur une ou plusieurs saisons qui causent un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays (**Khaldiet al., 2005**).

La sécheresse est aussi définie selon les différents secteurs qui interagissent avec ses effets. On définit donc une sécheresse du point de vue météorologique, hydrologique, agricole ou socio-économique (**Khaldiet al., 2005**).

Dans ce chapitre, on va donner quelques définitions sur le climat ainsi qu'une présentation de la théorie de la sécheresse et quelques études qui ont été réalisées sur ce phénomène.

2) **Le climat et le temps** :

Le climat et le temps sont deux notions différentes. Le temps, c'est l'état de l'atmosphère défini par les éléments météorologiques: la température, les précipitations (la pluie, la neige, etc.), l'humidité, l'ensoleillement et le vent à un endroit précis (**Gibbs ;1987**).

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

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

3) **Le système climatique** :

Le système climatique de la terre se compose d'éléments en interaction complexe (**Khaldiet al., 2005**). L'élément moteur est le Soleil, dont l'énergie réchauffe la Terre. Cette énergie est à l'origine de la circulation atmosphérique et océanique ainsi que des processus d'évaporation et de précipitation qui font partie du cycle de l'eau (**Khaldiet al., 2005**). En plus de l'atmosphère et des océans, le système climatique englobe les eaux douces, les plantes, les animaux, les couvertures de glace et de neige, les masses terrestres et même la croûte terrestre. (**Khaldiet al.,2005**).

4) Changement climatique :

Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990 (**GIEC, 2008**). Il y a des manifestations climatiques qui s'intéressent aux changements climatiques et à leurs conséquences socio-économiques.

Parmi ces manifestations on peut citer :

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

Parmi les études qui ont été effectuées par la communauté scientifique (**GIEC, 2008**), il y a plusieurs méthodes en relation avec les changements climatiques ont été mises au point dans ce contexte (**WMO, 1966; Lubès et al, 1994; et Cavadias., 1994**).

Les changements climatiques supposent la variation à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur des périodes de longue période. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit le flottement des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence. (**Khaldiet al., 2005**). Le suivi du cycle climatique de l'eau, reconnu comme l'un des manifestations majeures du climat, permet d'appréhender certains aspects de l'évolution de ce dernier. Ainsi, **Ouarda et al., (1999)** ont indiqué que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont:

- Le débit des oueds,
- Le niveau des cours d'eaux,
- Les précipitations,
- Les températures de l'air et de l'eau,
- La date de rupture du couvert de glace et sa durée ,
- Le niveau des eaux souterraines.
- Le changement de la moyenne
- Le changement de la variance.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en

évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté :

- Une diminution de la pluviométrie annuelle (**Hubert et Carbonnel, 1998; Paturel et al., 1995; Paturel. et al., 1997;** (Bello, 1998 ; Servat et al., 1999).
- Une diminution des débits des rivières (**Sircoulon, 1987; Opoku-Ankomah et Amisigo., 1998**),
- Une diminution des niveaux des lacs (**Sircoulon, 1987**),
- Une forte intensité de pluies (**Houndénou et Hernandez, 1998**); ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse.

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

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

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

- 1) L'occurrence du déficit en précipitations dans une très vaste zone durant les années 1944, 1945, 1970, 1973, 1980, 1981, 1989 et 1990, où au moins entre 4 et 6 des huit sous régions traitées ont été touchées;
- 2) Certaines zones sont plus affectées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale;
- 3) Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

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

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

C'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité, de la répartition des précipitations, et une amplification des phénomènes extrêmes tels que l'inondation et la sécheresse **GIEC (2008)**. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, dans le temps et

dans l'espace, présagent que cette tendance est en passe de devenir structurelle en relation avec le réchauffement climatique.

5) **Sécheresse** :

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses (**Obassi, 1994**). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (**Watson et al. 1997 ; Chloé 2014 ; Carlson et al., 2019**). En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse gravée Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes (**FAO 2000**). Au sud de l'Afghanistan, la population entière (300 000 familles) du désert du Registrant a fui lorsque leurs sources d'eau se sont asséchées. Au Pakistan, la sécheresse dans les provinces du Baloutchistan et de Sindh a été signalée comme étant l'une des pires de l'histoire du pays (**FAO 2000**). En Iran, 18 des comtés et 28 provinces ont été confrontés également à une sécheresse grave.

L'Hôte et al. (2002) montrent, suite à une analyse d'un indice des précipitations annuelles au Sahel ouest africain, que la sécheresse n'est pas encore terminée en fin de l'année 2000. Cependant, les modifications climatiques subies par l'Afrique durant le XXème siècle sont très nombreuses et n'ont pas les mêmes emprises (**Paturel et al, 2004**). En effet, pour l'Afrique Centrale, les modifications les plus importantes sont survenues au cours de la première moitié du siècle avec une augmentation de la pluviométrie annuelle. Quant à l'Afrique de l'Ouest, une diminution très marquée de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 a été détectée (**Paturel et al, 2004**).

Elle a de plus une étendue qui ne semble pas avoir eu d'équivalent au cours du XXème siècle.

Les pays comme le Ghana, le Togo, le Bénin et la partie maritime du Nigeria n'ont connu aucun changement notable (**Paturel et al, 2004**). L'Afrique sahélienne a été la plus sujette à de nombreux changements au cours du siècle: dans son ensemble, elle a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1940 puis une diminution vers 1970; sa partie centrale a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1919 puis une diminution vers 1970.

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

Ces années de rupture sont aussi en phase avec le découpage donné par le filtre passe-bas de Hanning de la station de Grand-Lahou. Ces années s'insèrent dans la période de rupture de la plupart des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire, à savoir 1966-1971 (**Servat et al., 1999**). Ces ruptures montrent aussi que la région de Grand-Lahou s'inscrit globalement dans la fluctuation du régime pluviométrique observée entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale (**Paturol et al., 1997,1998 ; Servat et al., 1998 et 1999**). **Kouame (2011)** a signalé une tendance des coefficients de tarissement à la hausse à partir de la rupture de 1970 dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest de Côte d'Ivoire. Les volumes mobilisés ont évolué inversement aux coefficients de tarissement. Ces volumes ont régulièrement baissés depuis l'année 1986 qui est caractérisée par une très faible pluviométrie. En effet, l'année 1986 est l'année qui a été marquée par une sécheresse particulièrement intense dans la région de Soubré. Cette sécheresse a contribué à la réduction des réserves d'eau de la région et a même affecté la recharge souterraine, ce qui a contribué à réduire les volumes mobilisés dans les différents bassins versants de la région. Les études de **Lubes-Niel et al., (1998)** ont également observé une augmentation des coefficients de tarissement dès 1969 sur cinq sous-bassins du fleuve Niger. Ces constatations ont également été faites par Nicholson, (1994) qui a signalé ce phénomène sur les bassins versants du Tchad. **Vissin (2007)** a fait ce même constat dans le bassin béninois du fleuve Niger.

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

Benzarti et al. (2001) a étudié la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle. Cette méthode a été déjà appliquée à l'échelle journalière et saisonnière (**Bergaoui, 1983**). L'auteur prouve que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23 à 40 % suivant une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

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

5.1) Définition de la sécheresse :

Plusieurs auteurs considèrent la sécheresse comme un événement physique. en réalité le risque associé avec la sécheresse dans chaque région est le résultat de l'exposition à l'aléa (probabilité de l'occurrence à différents niveaux de sévérité) et de la vulnérabilité de la société à l'événement (**Aghrab A, 2005**).

5.1-a)La sécheresse météorologique : Est due à la réduction naturelle de la pluviométrie sur une région donnée pendant une année ou sur plusieurs années successives (**Aghrab A, 2005**).

*5.1-b) La sécheresse hydrologique :*Est la réduction de l'écoulement superficiel dans les cours d'eau et, par conséquent, elle conduit à une diminution des volumes stockés dans les ouvrages hydrauliques et à une baisse naturelle du niveau d'eau dans les nappes souterraines. (**Bergaoui et Alouini, 2001**).

5.1-c)La sécheresse agricole : se produit lorsque l'humidité du sol est insuffisante pour subvenir aux besoins des cultures, des pâturages et des espèces des parcours (**GAR, 2011**)

5-2) Sécheresse en Algérie :

5-2-a) Historique des sécheresses en Algérie :

L'Algérie connue une terrible sécheresse durant les années 1945 et 1947 dans les régions de limite de Sahra , le Sud Oranais et dans les régions de d'Ain Safra, environ 3000 morts de faim sur une populations de 80000 habitants et 900000 moutons, soit 90 % du cheptel ont péri(**Vaillant 1977**).

Dans le Nord Algérie une étude sur l'évolution climacique a été réalisée durant l'année 1994.les auteur se sont basé sur le paramètres de précipitations pour caractériser le phénomène de sécheresse, sont basé sur les calculs statistiques sur 120 stations pluviométriques bien réparties sur le Nord de l'Algérie. Cette étude a montrée l'existence des périodes sèches et humides entre 1922 et 1992(**Demmak et al., 1994**).

Dont il apparait :

- Une période humide de 1929 à 1939 ;
- Une période sèche de 1939 à 1948 ;
- Une période humide de 1948 à 1972 ;
- Une période sécheresse accentuée de 1973 à 1992.

Les sécheresses de 1910/1920 et celle de 1938/1948 ont été caractérisés par des famines, des incendies de forêt, des perturbations sociales importantes. Pour l'épisode 1973/1992, l'ampleur de déficit pluviométrique n'a pas manqué de réapparut. Un déficit pluviométrique a été enregistré de l'Est vers l'Ouest, passant de 17% à l'Est à 33% à l'Ouest, d'autre part cette sécheresse a provoqué des effets néfastes sur les ressources hydriques où elle est enregistrée des diminutions importantes sur les écoulements et les apports aux barrages, un abaissement des niveaux piézométriques des nappes, un assèchement des puits de faible profondeur et le tarissement des sources (**Demmak et al., 1994**).

Une étude similaire confirme la tendance à la sécheresse pour la période 1975 à 1998, dont l'ampleur de déficit pluviométrique est estimée à 20 % à l'Ouest et 11 % à l'Est (**Demmak et al., 2001**).

Une sécheresse accentuée qui a touché le territoire Algérien qui provoqué une pénurie d'eau surtout dans les grands centres urbains comme Alger et Oran. (**Ait Mouhoub et al., 2001**).

5-2-b) Impacts de la sécheresses :

a) Impact sur les écoulements et les apports aux barrages :

La sécheresse provoqué la diminution des apports aux barrages et lacs va engendrer la diminution des stocks d'eau dans les réservoirs naturels (lacs) et artificiels (barrages) et perturber la distribution de l'eau vers les agglomérations et périmètres irrigués (**Safar-zitoun, 2019**).

Les oueds les plus touchés sont les oueds de la Tafna et d'Hamam qui ont vu depuis les années 1975 leurs débits baisser de 40 % par rapport aux moyennes inter-annuelles (**Amara 2010**).

Le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche doté de 5 barrages d'une capacité globale de 380.10^6 m^3 , cumule depuis le milieu des années soixante-dix un déficit pluviométrique estimé à 25 % (**Ghenim et al., 2010**). Cette diminution de la pluviosité a engendré une baisse sans cesse croissante des ressources en eau superficielles (**Khaldi, 2005**). Le niveau de stockage des barrages a atteint des niveaux alarmants, au point que la cuvette du barrage Meffrouche s'est complètement asséchée en octobre 2006 (**Nekkache et Megnounif, 2013**).

Les barrages de Beni-Bahdel et de Bou-Hanifia qui régularisaient globalement en temps normal 150 Hm³ ont vécu depuis les années 1977/78 les situations les plus critiques de leur existence. Durant l'été 1988, ces barrages étaient pratiquement vides (**Amara 2010**).

b) **Impact sur les eaux souterraines** :

Le déficit pluviométrique va diminuer le taux de renouvellement des eaux souterraines et pousser à l'excès d'exploitation et/ou de surexploitation des nappes(**Safar-zitoun, 2019**).

Suivant la nature et l'importance de leurs réservoirs, les nappes souterraines réagissent aux phénomènes de sécheresse avec un décalage plus ou moins important qui leur permet de traverser les périodes de sécheresse courte, sans trop de dégâts.(**Amara 2010**).

La sécheresse actuelle a entraîné dans la majorité des cas :

- Un abaissement général du niveau des nappes.
- Un assèchement des puits de faible profondeur.
- Un dénoyage des équipements de pompage, entraînant une réduction des débits de forages.
- Le tarissement des sources.
- Une aggravation des risques de pollution et d'intrusion saline.

Durant l'année 1973 une nette diminution a été estimée à plus de 25 %. Les déficits pluviométriques se sont succédé durant plusieurs années, avec par conséquent la diminution des débits de l'oued principal de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest Algérien), à savoir l'oued Fekan, et cela jusqu'à son quasi-assèchement ces dernières années., la baisse piézométrique atteignant plus de 60 mètres dans certains secteurs de la région(**Bekkoussa, et Meddi,2008**).

c) **Impact sur la production agricole** :

La production céréalière est fortement liée aux précipitations annuelles et à la répartition mensuelle des pluies. Les statistiques de production céréalières montrent que les années de faible production correspondent aux années de déficit pluviométrique (1910, 1920, 1966, 1977, 1981, 1983, 1988). (**Amara, 2010 ; Chabane, 2012**).

Les périmètres d'irrigation sont généralement les principales victimes des sécheresses, étant les premiers sacrifiés au profit de l'alimentation en eau potable et industrielle. Un des périmètres les plus touchés par la sécheresse est celui de Habra pour lequel les allocations ont

baissé de 83 Hm³ en 1989. Ce périmètre a reçu durant les 10 dernières années une dotation moyenne de 13 Hm³ sur une dotation normale de 65 Hm³ (Amara, 2010).

d) **Impact sur milieu naturel et l'environnement** :

La sécheresse peut provoquer une baisse de la biodiversité végétale, et aussi animale quand la faune ne peut plus se nourrir; certaines espèces de la pharmacopée et des systèmes de culture disparaissent progressivement (Charreton, 2009).

La sécheresse peut affronter aussi une détérioration de la qualité de l'eau généré par l'affaiblissement de la dilution des polluants va amplifier la contamination des réserves hydriques (Safar-zitoun, 2019).

e) **Impact sur les secteurs de la santé et de la population**

La sécheresse accompagnée ou non de la canicule va provoquer (Safar-zitoun, 2019):

1. La déshydratation des populations et l'apparition de maladies ;
2. L'apparition d'épidémies dues à la malnutrition et autres effets ;
3. Augmentation des maladies respiratoires et cardio-vasculaires (ex : allergies, hypertension.)
4. Des problèmes d'Invasions biologiques ;
5. Un risque accru de morsures de serpents, scorpions, autres animaux et insectes ;
6. Un risque accru d'émergence de nouvelles maladies dues aux migrations des vecteurs et agents pathogènes

6) **Quelques travaux et recherches effectués en sécheresse dans le monde:**

Différentes études et recherches ont été menées à ce jour en différentes régions on cite par exemple :

6. 1) En Europe :

*Lors du mois d'août 1976 Tommy Klein (2009) observe d'énormes contrastes entre le nord et le sud de l'Europe. Le sud subit des conditions plus humides que la normale, tandis qu'à partir du nord de la France jusqu'au nord de la Scandinavie, peut véritablement parler de sécheresse météorologique extrême. Cet événement constitue d'ailleurs un record en Belgique, les précipitations ayant été extrêmement faibles durant de nombreux mois. En revanche, le mois d'août 2003 semble moins contrasté, l'entièreté de la région d'Europe étudiée subissant des sécheresses faibles à modérées. En revanche, il a basé sur les anomalies de température, l'été 2003 est particulièrement exceptionnel. En effet, la température moyenne du mois d'août 2003 fut nettement supérieure à la moyenne du mois d'août sur le long terme, principalement dans le centre de la France. D'ailleurs, l'indice de canicule

moyenné du 1er au 20 août indique que les conditions de chaleur furent extrêmement dangereuses dans cette même région pour les personnes les plus vulnérables, tout comme en Espagne et en Italie. Ces valeurs élevées de l'indice de canicule furent accompagnées d'un nombre de décès par jour largement supérieur à la moyenne normalement observée en France pour la saison. À ce stade, il peut donc dire que 1976 fut une année de sécheresse véritable, tandis que 2003 fut une année caniculaire avec de lourdes conséquences sur la santé humaine.

***Maccioni et al (2014)** ont analysés spatialement le risque de sécheresse dans le bassin du Tibre supérieur à Italie pour trouver un indicateur représentatif à partir de données météorologiques. Une comparaison entre les indices de sécheresse a été effectuée à différentes échelles de temps (9, 12 et 24 mois). Cette analyse démontre (1) l'évolution très similaire et le comportement des trois indices et (2) la fiabilité du SPI pour surveillance et caractérisation de la sécheresse dans le cas du bassin du haut Tibre, en utilisant également les effets hydrologiques observés. On constate que les zones les plus vulnérables se situent dans la partie sud et la partie supérieure du bassin du Tibre et la partie centre-nord est moins touchés par la sécheresse.

6. 2) En Amérique :

***McKee et al (1997)** ont utilisés les SPI pour analyser la variabilité de la sécheresse historique aux États-Unis afin d'élaborer des stratégies d'atténuation de la sécheresse avec informations sur la façon de mettre sécheresse qui sévit actuellement dans le quartier historique perspective.

***Dans la recherche d'un système de surveillance de la sécheresse Alfonso et al (2006)**, le SPI apparaît comme l'indice le mieux adapté au problème posé car, en jouant sur l'utilisation d'échelles de temps variées, il offre la possibilité d'établir des relations entre la sécheresse et certains phénomènes d'amplitude temporelle différente. Ils pouvant ainsi tenter de faire coïncider les dates de semis ou de croissance des plantes avec les périodes les plus arrosées, de déterminer les époques de risque pour le développement des cultures, de prévenir les possibilités d'incendies forestiers d'évaluer l'importance de la recharge des nappes phréatiques et des barrages.

***Freitas et Billib(1997)** ont fait la modélisation par le réseau de neurones. Ils ont trouvées que les résultats peuvent être utilisés pour un système de suivi de la sécheresse, pour décider les mesures appropriées pour atténuer les effets d'une sécheresse actuelle, comme des outils appropriés pour la gestion des réservoirs et d'analyse d'impact de la sécheresse sur la production de l'agriculture dans le nord du Brésil.

***Anctil and Tape (2004)** ont fait une étude qui consiste en une comparaison de la performance de réseaux de neurones artificiels multicouches et d'un système hybride neuro-ondelette pour la prévision un jour des débits à deux sites. Des spectres de puissance Morlet sont exploités pour étudier l'échelle des périodes de séries temporelles de pluie et de débit. Les séries temporelles sont décomposées en ondelettes en trois sous-séries décrivant les processus pluie-débit de courtes, moyennes et longues périodes. Des réseaux multicouches sont ensuite entraînés pour chacune de ces sous-séries. Les résultats révèlent que les courtes périodes sont responsables de la majeure partie des erreurs associées au système hybride neuro-ondelette. Les fluctuations courtes sont donc la clef de tout progrès supplémentaire dans la modélisation des processus pluie-débit par réseaux de neurones artificiels. La performance finale du système hybride neuro-ondelette et des réseaux multicouches classiques sont très semblables. Le léger avantage en performance du système hybride neuro-ondelette peut être expliqué par une meilleure utilisation de la série temporelle de l'évapotranspiration.

6.3) En Asie :

***Dastorani et Afkhami (2011)** ont appliqués le modèle de réseaux de neurones artificiel pour la prédiction de la sécheresse en Iran. Entre les combinaisons de variables d'entrée de la moyenne mobile des précipitations mensuel de 3 ans et la température maximal mensuelle ils ont présenté des résultats de prédiction plus appropriées. Il doit être mentionné que la sécheresse est une variable extrême, ce qui est très difficile à prévoir surtout avec assez de délai et une précision acceptable. En général, Ils ont constaté que le RNA est un outil efficace pour modéliser et de prévoir les épisodes de sécheresse. La comparaison de leur conclusion de les travaux de **Mishra (2006)** et **Morid et al (2007)** montre que l'exactitude des prédictions dans cette recherche est plus élevée que celle présentée dans les deux autres études mentionnées.

6.4) En Afrique :

***Dans cette étude Fodé, et Adamou (1991)** ont essayés d'ajuster distributions empiriques (observées) des séquences sèches al'aide de modèles de la chaîne de MARKOV, ils ont utilisé à cet effet les données de pluviométrie journalière de certaines stations du Niger pour les deux périodes 1950-1970 et 1971-1991.

Il est apparu que la chaîne de MARKOV de 2e ordre donne un meilleur ajustement de la distribution des probabilités empiriques d'occurrence des séquences sèches; cet ajustement est d'autant meilleur que les fréquences des précipitations sont élevées et que la longueur de la série des données est limitée au dernier jour pluvieux de la saison. Ils ont aussi déduit que la saison des pluies s'installe effectivement au Niger en juillet.

***Afouda et Adisso(1997)** ont choisi d'étudier l'influence de la pluviométrie sur l'écoulement dans les rivières, le niveau de la nappe souterraine et la production agricole. A partir des données pluviométriques des stations synoptiques du Bénin (Cotonou, Bohicon, Savè, Parakou, Kandi, Natitingou), une étude systématique de l'évolution des longueurs de séquences sèches a été entreprise en considérant deux sous-périodes: de 1952 à 1972, puis de 1973 à 1993.

Ils ont montrés dans cette étude que les phénomènes physiques qui sont à l'origine des précipitations annuelles au Bénin et en Afrique de l'Ouest conduisent à une modélisation stochastique des structures des séquences sèches (ou humides) par la chaîne de Markov d'ordre un. Bien que cette étude permette de dégager certaines tendances telles que l'augmentation des séquences déficitaires dans la sous-période de 1973-1993, surtout dans la région nord traditionnellement considérée comme le château d'eau du pays, le modèle présenté ne constitue qu'une approximation du phénomène géophysique complexe en cours dans cette région. En effet cette augmentation du déficit pluviométrique peut être dû soit à une diminution du nombre de jours de pluie au cours de l'année, soit à une baisse générale de l'intensité des pluies, soit encore à une conjugaison des deux phénomènes.

Une étude comparative des deux sous-périodes d'une part et de ces sous périodes avec la période totale considérée montre une modification profonde de la répartition des précipitations et de leur structure dans les différentes stations synoptiques.

***Ardoin et al (2003)** ont utilisées la méthode de l'Indices pluviométriques et représentations cartographiques. L'indice pluviométrique annuel qui traduit un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée par rapport à la période de référence choisie. Ils ont observé d'après la cartographie régionale de la moyenne par quinquennat des indices pluviométriques, que la région est déficitaire dans son ensemble entre 1970 et 1995 et ponctuée de zones excédentaires. Ce caractère déficitaire s'accroît au cours de la décennie 80 et apparaît très marqué entre 1980-1984; les valeurs des indices y sont très élevées en valeur absolue. La période 1990-1995 apparaît toujours déficitaire, cependant les valeurs des indices sont plus faibles en valeur absolue. Cette représentation cartographique souligne bien le fait que le caractère déficitaire apparu depuis les années 70 se prolonge durant la première moitié de la décennie 1990.

Sur la cinquantaine de stations étudiées, seules trois stations du Burkina Faso et cinq du Mali enregistrent un changement structurel entre les décennies 1980 et 1990. Au vu des résultats obtenus, il est raisonnable de penser que les bassins étudiés ont conservé des

caractéristiques pluviométriques stables entre ces deux décennies, cette stabilité s'appuyant sur les relations existant entre les mois considérés. Il s'avère que, malgré la reprise des pluies en 1985-1986 et 1994, la période 1985-1998 reste déficitaire. La sécheresse semble donc s'être poursuivie en Afrique de l'ouest durant la décennie 1990.

***(Soroet al., 2013)** ont fait une analyse sur les épisodes secs à diverses échelles temporelles dans les régions de nord-ouest de la Côte d'Ivoire en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation en matière de gestion de l'eau. Après l'utilisation de l'indice standardisé des précipitations calculé pour des échelles de temps de 5 ans, 35 ans et 70 ans, il ont trouvés que les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence se sont produites durant la période 1970-1999 et cela quelle que soit l'échelle de temps considéré. Des sécheresses de type extrêmement sévères a été remarquable en 1983 et 1987 avec

6.5) Au Maghreb :

***Bergaoui et Alouini(2001)** Une étude de la sécheresse météorologique et hydrologique dans la région de Siliana en Tunisie a été effectuée en se basant sur plusieurs indices. Les résultats obtenus montrent que la méthode des écarts à la moyenne donne un pourcentage de 60 % d'années sèches. L'analyse fréquentielle révèle que la sécheresse est de classe modérée (35 %). La fréquence d'apparition d'années successives sèches est relativement élevée : 55 % d'années sèches sont formées de deux, trois ou cinq années sèches consécutives. Quant à la sécheresse hydrologique, elle est plus accentuée, prouvant la dissymétrie des apports et la tendance générale des phénomènes hydrologiques à faible hydraulicité.

***Stour et Agoumi(2008)** ont étudiés la sécheresse au Maroc Ils ont trouvés les résultats suivants :

- La sécheresse s'est imposée avec force ces dernières décennies en tant qu'élément structurel du climat du Maroc ;
- Les précipitations ont connu globalement une tendance à la baisse :
- En l'occurrence des années humides généralisées sur l'ensemble de territoire devient une exception
- un réchauffement du climat significatif accompagne cette installation de la sécheresse au Maroc avec une évapotranspiration correspondante qui croît aussi. Il en résulte un déficit hydrique de plus en plus marqué qui fragilise l'équilibre offre-demande ;
- à l'échelle saisonnière, on perçoit une diminution de l'importance de printemps et de l'automne. On s'oriente vers un climat bi-saison : hiver-été

***Benzarti et Habaieb(2001)** ont fait un travail pour but de préciser la probabilité de la sécheresse en Tunisie où elle est fréquente et peut durer plusieurs années. La fréquence de tels événements varie d'une région à l'autre. Les résultats qui peuvent être dégagés à la suite de cette analyse sont que, quelles que soient les conditions de sécheresse ou d'humidité au départ :

- la probabilité d'avoir une année « sèche » est plus faible que la probabilité d'avoir une année « non sèche » ;

-il existe une disparité nette entre les régions Nord, Centre et Sud ;

-une différenciation très nette apparaît entre l'est et l'ouest pour le nord et le sud mais elle disparaît dans la Tunisie du centre où la distinction entre le Centre-Ouest et le Sahel n'est plus sensible.

-de plus, si une année est sèche, la probabilité d'avoir une seconde année sèche varie de 23 à 40 %. Cette probabilité est plus importante à l'ouest qu'à l'est et au nord plus qu'au sud (à l'ouest).

-si deux années successives sont sèches, la probabilité d'avoir une troisième année sèche varie de 11 à 45 %. Cette probabilité est importante au nord et au centre (43 et 45 %) tandis qu'elle est faible au sud (14 à 17 %).

La persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre de la Tunisie, régions qui contribuent d'une façon considérable à la production agricole. Une stratégie de développement de modèles de gestion et d'économie des ressources en eau est un moyen efficace de lutte contre les aléas de la pluviométrie.

*A l'échelle du Bassin hydraulique Oum Erbia au Maroc, (**Jouililet al., 2013**) ont utilisé les indices de sécheresses pour la surveillance et la prévision de la sécheresse. Ces indices permis de montrer que le bassin hydraulique Oum Erbia a connu des épisodes secs 1980/81 à 1985/86, de 1991/92 à 1994/95 et de 2000/2001 à 2002/2003, l'examen des années de sécheresse fait ressortir une fréquence plus élevée et une extension spatiale plus importante des sécheresses qui sont désormais plus longues, plus fréquentes et elles se succèdent. Le bassin hydraulique a connu une augmentation de sa température moyenne d'environ 1°C, renseignant sur le phénomène global de réchauffement.

6-6) En Algérie

***Khaldi(2005)** est utilisé différentes méthodes comme celles des quintiles et des terciles. Ces méthodes ont confirmée la persistance et l'abondance des années déficitaires pour la région d'étude.

L'étude des séquences sèches et des séquences pluvieuses par les chaînes de MARKOV qui ne sont fondées que sur les états des jours, secs ou pluvieux a montré que les séquences sèches ont une longueur moyenne qui augmente au fur et à mesure que le seuil croît. Le modèle Markovien ajuste bien les séquences pluvieuses, par contre l'ajustement des séquences sèches par ce modèle montre qu'il existe une grande différence entre les fréquences calculées et les fréquences théoriques surtout lorsque nous allons vers des seuils plus grands. La distribution saisonnière de ces séquences est en relation avec les rendements

L'analyse de la température minimale et maximale moyenne a permis de déceler une augmentation des minima et des maxima sur la station d'Oran durant les deux dernières décennies. Cette tendance à la hausse de la température a engendré une accélération de l'évapotranspiration qui s'accompagne d'un manque d'eau dans le sol

Les représentations graphiques et l'analyse cartographique de l'indice pluviométrique montrent qu'au cours du dernier siècle, l'Ouest algérien a connu une succession de périodes à déficits et de périodes à excédents pluviométriques sans toutefois, pouvoir parler de cycle.

Il apparaît d'une façon générale une tendance à la hausse couvrant les années 30 et les années 50. La baisse de la pluviométrie était par contre marquée pendant le début des années 40 et le milieu des années 70.

***Meddi et Meddi (2009)** ont fait une étude sur la persistance de la sécheresse, ils ont utilisé les chaînes de Markov, cette méthode a montré que pour avoir une année non sèche après une année sèche, la probabilité est plus importante au Centre du pays qu'à l'Ouest et pour avoir deux années sèches successives, la probabilité est plus importante à l'Ouest qu'au niveau des plaines du Centre. A l'échelle saisonnière, la probabilité pour avoir un hiver sec après un hiver quelle que soit sa nature est peu élevée pour toute la région. Pour qu'un hiver sec soit suivi par un non sec l'année suivante, la probabilité est importante au niveau de la Mitidja et de Maghnia à l'extrême Ouest de l'Algérie. Pour l'apparition de deux hivers non sec successifs, la probabilité est élevée partout.

***Ghenim et Megnounif (2011)** Ils ont utilisés le (SPI) pour une période de 63 ans. Il a permet d'identifier les fréquences d'humidité et de sécheresse pour les bassins versants abritant les barrages de Meffrouche et de Béni Bahdel. A l'aide du SSFI (Standardized Stream Flow Index),

on identifie également les fréquences d'écoulement déficitaires et excédentaires. Les résultats obtenus montrent que ces bassins ont connu globalement des périodes d'humidité et de sécheresse légères avec une tendance à la sécheresse. Quoique des années particulières ont été très humides ou extrêmement sèches. Malgré l'absence de simultanéité entre les valeurs du SPI et du SSFI, ils ont notés que l'apparition d'une ou deux années déficitaires en pluviométrie au milieu d'années excédentaires, n'a pas d'effet direct sur les apports en eau aux barrages. Par contre, la succession de plusieurs années à pluviométrie modérée peut générer une année à écoulement abondant. D'autre part, l'utilisation de la méthode double masse entre les précipitations et les apports en eau montre l'existence d'une cassure d'homogénéité située vers les années 1980.

7) Conclusion :

La sécheresse que nous vivons est un phénomène préoccupant, en effet ses conséquences sur les activités agricoles et de façon générale sur le développement socio-économique sont importantes.

Une planification à long terme d'utilisation des ressources en eau qui tient compte de cet aléas permettra de faire face à des déficits hydriques à caractère pluviale

Chapitre II
Matériels et méthodes

1) Présentation de la zone d'étude :

La partie nord-ouest algérienne s'étend sur 250 km du sud au nord et 500 km environ de l'ouest à l'est (figure 01). Le territoire est caractérisé par un climat doux et une humidité relativement élevée. Les précipitations vont de 400 mm à l'ouest à 900 mm à l'est. Les sept plaines de la zone d'étude sont connues pour leur fertilité et leur production agricole (Meddi et Meddi 2009).

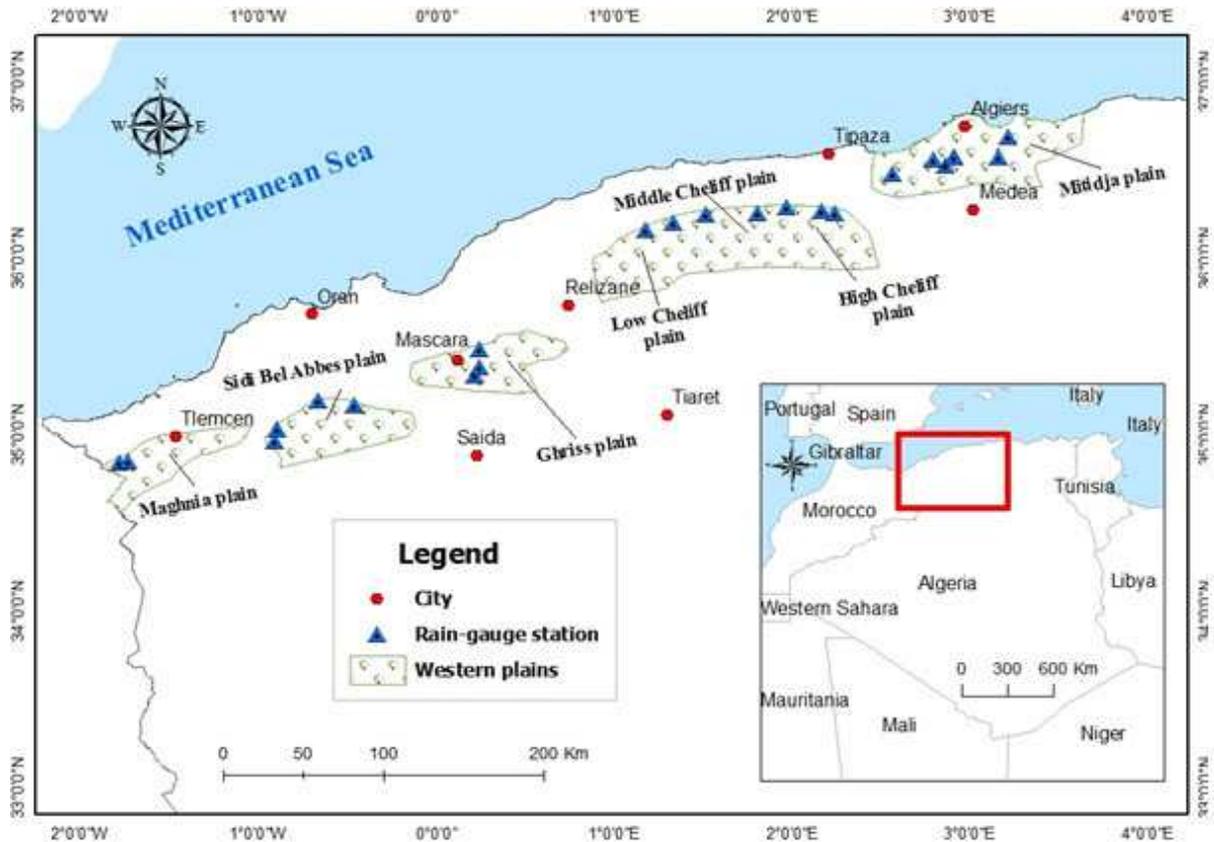


Figure 01 : Localisation géographique des sept plaines de la région d'étude

-Plaine de Mitidja : C'est une étroite bande littorale qui s'étend sur une centaine de kilomètres dans la région Nord-Centre de l'Algérie, avec un climat méditerranéen favorable à l'agriculture. La plaine est située à proximité d'Alger, qui constitue un vaste marché potentiel. L'existence de ressources en eau souterraines ainsi que la longue expérience dans l'agriculture irriguée dans cette région, constituent une véritable garantie de revenus pour les agriculteurs. (Amar et al., 2011).

Avec une superficie totale de 1400 km² et une superficie agricole de 120.000 ha à 130.000 ha, la plaine de la Mitidja englobe les wilayas d'Alger, Blida, partiellement celles de Tipaza et Boumerdes (Amar et al., 2011).

-Plaine de Haut Cheliff : La plaine alluviale du Haut Cheliff à une superficie de 370 Km² et de 270 m d'altitude moyenne et elle est située à 100 Km au Sud-Ouest d'Alger, limitée par : le massif du Zaccar au Nord, de l'Ouarsenis au Sud, de Gountas à l'Est et Doui à l'Ouest.

-Plaine de Moyen Cheliff : Le périmètre de Moyen Cheliff s'étend sur une superficie de 40000 ha environ, il est limité par le périmètre de la Mina à l'Ouest, le massif du Dahra au Nord et le massif de l'Ouarsenis au Sud (**Meddi et Meddi, 2009**) .

-Plaine de Bas Cheliff : La plaine du Bas Cheliff se situe dans la partie nord-ouest de l'Algérie. Elle fait partie du grand bassin versant « Cheliff-Zahrez » qui occupe plus de 22 % de la superficie de l'Algérie du nord.

-La plaine de Ghriss : La plaine de Ghriss fait partie du bassin versant de l'oued Fekan qui s'étend sur une superficie de 1185 km². Située dans le Nord-Ouest algérien, entre 35° 32' 60 et 35° 5' 28" de latitude N et entre 0° 4' 48" W et 0° 27' 0" E de longitude, elle est limitée au Nord par les monts de Béni Chougrane, au Sud par les monts de Saida, à l'Ouest par les monts de Bouhanifia et à l'Est par le plateau de Tirenifine. Administrativement, la région dépend de la wilaya de Mascara. La plaine est une étendue plate de 470 mètres d'altitude moyenne, surplombée par des reliefs de bordure élevés jusqu'à 1100 mètres d'altitude au Sud (montagne de Nesmoth). La limite Nord de la plaine est distante de la mer méditerranéenne de moins de 100 kilomètres et sa limite Sud se trouve à une centaine de kilomètres de l'Atlas saharien. Par conséquent, elle se trouve soumise à la fois aux influences climatiques méditerranéennes et sahariennes. Ces dernières sont nettement prédominantes du fait de l'écran forme par les monts de Béni Chougrane au Nord (**Ouis S. 2012**).

-la plaine Sidi Bel Abbès : la plaine fait partie de l'ensemble des hautes plaines de l'Oranais. C'est la plaine de Sidi Bel Abbès, située dans l'extrême Nord-Ouest d'Algérie, d'une superficie de 1 166 km². Elle se situe entre -0°94' de latitude et 35°17' de longitude (**Bentekhici et al., 2017**). L'altitude minimale est de 405 m et maximale de 1 200 m. Elle est d'une topographie relativement plane encadrée par les reliefs suivants : au nord, par les monts de Tessala, segment occidental de l'atlas tellien, à structure plissée; au sud, par l'ensemble montagneux d'oued Mimoun, Sidi Ali Benyoub, formant la bordure septentrionale des hauts plateaux; à l'ouest par la vallée de l'oued Isser; à l'est par les reliefs des Beni Chougrane et Bou Hanifia qui forment la limite orientale (**Abtout, 2013**)

-La plaine de Maghnia : Le périmètre de Maghnia est scindé en trois ensembles distincts séparés par des cours d'eau. Le premier ensemble, le plus important de part sa superficie est

circonscrirentre la confluence d' Oued Ouederftou et Oued Abbes. Il présente un terrain plat et il est compris entre les côtes (NGA) 365 m et 350 m. Le second ensemble, inscrit entre les courbes de niveau 360 m et 350 m. Il complète le premier au Nord-Est. Il s'installe entre l'intersection de la route nationale n°35, la confluence de Oued Taharharet et Châbet el Melah. Le dernier ensemble limitrophe de la station d'épuration, situé au-delà de la confluence de Oued Ouderflou et Oued Abbes, est localisé en rive gauche de Oued Taharharet. Il est cerné par les courbes de niveau 360 m et 350 m(**Meddi & Meddi 2009**)

2) Description de la base de données :

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

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

Quarante cinq (45) stations ont été retenues dans cette étude dont les longueurs des enregistrements sont de cinquante ans (50 ans) (Tableau 01).

Tableau 01: Les stations pluviométriques retenues pour l'étude.

<i>Nom station</i>	<i>Code station</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>z (m)</i>
AIN DEFLA	01 18 04	434 522,00	331 639	271
AMMI MOUSSA	01 26 05	357 400	286 150	140
GHRIB BGE	01 11 05	487 250	318 400	460
BENAIRIA	01 22 05	378150	338400	320
DERRAG	01 13 02	472 150	289 850	1150
FODDA Barrage	01 21 08	402 000	305 600	430
L HILLIL	01 35 07	288 650	272 000	125
ROSFA	01 32 02	330 600	179 500	960
ROUINA MAIRIE	01 19 04	419 896	328 186	190
SIDI LAKHDAR	01 17 11	452 000	329 650	250
SIDI-MEDJAHED	01 18 03	452 844	338 083	945
ES SOUALA DOMAINE	01 22 18	363200	318500	100
THENEIT EL HAD	01 16 05	439 800	285 650	1150
TIRCINE	01 32 03	303 900	180 500	1070
AIN FARES	011 14 17	277 550	245 300	806
LARBAA	02 14 03	541150	362950	100
BENI MERED	02 12 08	514 500	358 000	140
BOUFARIK PEPINIÈRE	02 12 09	518 550	363 400	60
BOUMEDFAA MF	02 10 17	480 050	341 250	270
FER A CHEVAL m	02 12 01	509950	373200	10
AMEUR EL AIN	02 10 20	488 100	352 750	120
MENACEUR	02 03 03	458 250	354 450	250
OUED EL ALLEUG	02 12 10	508 500	361 750	55
BOU HENNI	11 16 05	247 500	255 400	26
MOSTEFA BEN BRAHIM	11 03 12	221 700	214 750	590
SIDI BEL ABBES	11 03 05	194 250	215 600	485
MATEMORE	11 14 05	274 150	228 550	482
CHOULY	16 06 01	149 650	181 000	700
BENI OUASSINE	16 03 03	90 800	180 700	410
PONTEBA BARRAGE	12203	393 900	327 400	140
AIN BOUCIF	11 104	540 750	287 800	1250
DAR EL BEIDHA		546 166,85	375 919,44	25
CHLEF		377 132,98	323 044,45	143
BNI BAHDEL		115200	165500	650
AIN LELLOU	12307	397400	293600	900
MAGHNIA		92 950,00	180 700,00	395
MAOUSSA		277 300	233 920	494
BOUFARIK PEPINIÈRE		518 550	363 400	60
KHEMIS MILIANA INRA		458 800	328 200	285
HAMIZ	20602	558550	367400	
BEN BADIS	110307	170 850	190 800	720
TESSALA	110313	184 500	222 050	577
HASSI ZEHANA	110317	172 700	198 200	470

3) Méthodes :

3.1) Outils d'évaluation de la sécheresse :

3.1-1) Indices de sévérité sécheresse :

Pour caractériser et identifier la sévérité de la sécheresse, plusieurs indices et méthodes sont utilisés dans e travail.

a. Indice de précipitation standardisé (Standardised precipitation index SPI):

L'indice standardisé de précipitation « SPI » (Standardised precipitation index) a été développé par (Mckee et al., 1993). Il prend en considération l'importance du temps dans l'analyse de la disponibilité des ressources en eau. En effet, la période de temps sur la quelle le déficit des précipitations est accumulé devient extrêmement importante pour séparer entre les différents types de sécheresses (Mckee et al., 1995). Il possède plusieurs caractéristiques incluant sa simplicité puisqu'il est basé seulement les précipitations, sa souplesse temporelle qui lui permet d'être calculé à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 12 ,24 et 48 mois) **Aghrab (2005)**.ces échelles de temps reflète l'impacte de la sécheresse sur les différentes ressources en eau **Hayes (1998)**.

L'indice SPI d'un lieu donné se calcul pour la période choisie, à partir des relevés à long terme des précipitations. La série des données de longue durée est ajustée à une distribution de probabilité que l'on transforme ensuite en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, du lieu considéré et pour le laps de temps étudié soit égal à zéro (**Edwards et McKee, 1997**).

- Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives des précipitations inférieures à la médiane (**Edwards et McKee, 1997**).

- L'indice SPI indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à -1,0 et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive (**Edwards et McKee, 1997**).

Thom (1958) a découvert que la fonction de densité de probabilité gamma à deux paramètres peut parfaitement convenir aux séries chronologiques de précipitations. La distribution gamma est définie par sa fonction de fréquence ou de densité de probabilité:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{for } x > 0 \dots\dots\dots(01)$$

Où $\alpha (> 0)$ est un facteur de forme, $\beta (> 0)$ est un facteur d'échelle et $x > 0$ est la quantité de précipitations. (A) est la fonction gamma qui est définie comme suit:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \dots\dots\dots(02)$$

Edwards et McKee (1997) ont suggéré une méthode utilisant l'approximation de Thorn (1966) pour obtenir le maximum de vraisemblance permettant d'estimer de manière optimale α et β ;

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \dots\dots\dots (03)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \dots\dots\dots(04)$$

Où :

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \dots\dots\dots(05)$$

n est le nombre d'observations de précipitations. Les paramètres résultants sont ensuite utilisés pour déduire la probabilité cumulée d'un événement de précipitation observé pour le mois donné ou pour toute autre échelle de temps:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\beta} dx \dots\dots\dots (06)$$

En laissant $t = x/\beta$, cette équation devient la fonction gamma incomplète:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \dots\dots\dots(07)$$

Puisque la fonction gamma n'est pas définie pour $x = 0$ et qu'une distribution de précipitation peut contenir des zéros, la probabilité cumulée devient:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \dots\dots\dots (08)$$

Où q est la probabilité de précipitation nulle. La probabilité cumulée, H (x), est ensuite transformée en la variable aléatoire normale Z et une variance égale à un, qui est la valeur du SPI. Les études d'Edwards et McKee (1997) et de Lloyd-Hughes et Saunders (2002), et la conversion approximative utilisée, fournie par Abramowitz et Stegun (1965) pour convertir facilement la probabilité cumulative en la variable aléatoire normale du Z ou SPI:

$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \dots\dots\dots(9)$$

Et

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \dots \dots \dots (10)$$

Où:

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \dots \dots \dots (11)$$

Et

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \dots \dots \dots (12)$$

etc₀ = 2.515517, c₁ = 0.802853, c₂ = 0.010328, d₁ = 1,432788, d₂ = 0.189269, d₃ = 0.001308

Tableau N° 02 : Classification de la sévérité de la sécheresse (**McKee et al 1993**).

Valeur de SPI	Catégorie de la sécheresse
SPI > 2	humidité extrême
1 < SPI < 2	humidité forte
0 < SPI < 1	humidité modérée
-1 < SPI < 0	sécheresse modérée
-2 < SPI < -1	sécheresse forte
SPI < -2	sécheresse extrême

a.1) Avantages: Les précipitations représentent le seul paramètre dont il faut disposer. Il est possible de calculer l'indice pour diverses échelles de temps, celui-ci permettant de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité. (**McKee et al 1993**). Il est moins complexe que bien d'autres indices et notamment que l'indice de sécheresse de Palmer. (**McKee et al 1993, Doesken et Kleist, 1993**).

a.2) Inconvénients: Il ne permet de quantifier que le déficit de précipitations; les valeurs basées sur des données préliminaires peuvent changer et les valeurs varient si la durée de la période des relevés s'allonge. (**McKee et al 1993**).

L'indice SPI a été conçu pour quantifier le déficit de précipitations à de multiples échelles de temps. Ces échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau. L'humidité du sol réagit relativement vite aux anomalies de précipitations, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme. C'est pourquoi **McKee et al. (1993)** ont initialement calculé l'indice SPI pour des laps de temps de 3, 6, 12, 24 et 48 mois.

- **SPI de 1 mois :**

Il est possible de mal interpréter l'indice SPI sur 1 mois si l'on ne tient pas compte des caractéristiques climatiques du lieu(OMM ,2012). Dans les régions où il est normal que les pluies soient faibles au cours d'un mois donné, il est possible d'obtenir des valeurs négatives ou positives importantes alors que l'écart par rapport à la moyenne est relativement faible. L'indice SPI sur 1 mois peut aussi induire en erreur lorsque les valeurs des précipitations sont inférieures à la normale dans des régions où, pour le mois considéré, le total normal des précipitations est faible(OMM ,2012). Tout comme les cartes du pourcentage de la normale des précipitations, celles de l'indice SPI sur 1 mois fournissent des informations utiles, mais il faut faire preuve de prudence quand on les analyse (OMM ,2012).

- **SPI de 3 mois :**

L'indice SPI sur 3 mois est l'indicateur des conditions d'humidité à courte et moyenne terme ainsi, il donne une évaluation des précipitations sur une saison (OMM ,2012). Il permet de trouver une comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. En d'autres termes, l'indice SPI sur 3 mois se terminant fin février permet de comparer le cumul des précipitations des mois de décembre, janvier et février de l'année examinée aux cumuls de précipitations de décembre à février de toutes les années figurant dans l'historique des observations exécutées à la station étudiée(OMM ,2012).

- **SPI de 6 mois :**

SPI de 6 mois est un indicateur des tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne terme on considère que pour cette échelle de temps, cette indice permet de donner une comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose des relevés(OMM ,2012). À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin septembre permet de comparer le cumul des précipitations d'avril à septembre de l'année examinée aux cumuls de précipitations de cette même période pour toutes les années écoulées.(OMM ,2012)

- **SPI de 9 mois :**

SPI de 9 mois c'est indicateur des régimes de précipitations inter saisonniers à moyenne terme. Il faut en général au moins une saison pour que des conditions de sécheresse s'installent. Un indice SPI établi sur 9 mois et présentant des valeurs inférieures à -1,5 est habituellement un bon indicateur de conditions sèches aux conséquences importantes pour l'agriculture et pouvant affecter d'autres secteurs également (OMM ,2012). Pour certaines régions, on s'apercevra que la représentation cartographique de l'indice Palmer correspond assez bien à celle de l'indice SPI sur 9 mois (OMM ,2012). Pour d'autres régions, le rapprochement se fera davantage entre l'indice Palmer et l'indice SPI sur 12 mois. C'est à partir de 9 mois qu'on commence à établir le lien entre une sécheresse saisonnière de courte durée et une sécheresse à plus long terme pouvant se transformer en sécheresse hydrologique ou en sécheresse s'étalant sur plusieurs années (OMM, 2012).

- **SPI de 12 mois et jusqu'à 24 mois :**

L'indice SPI de 12 mois et jusqu'à 24 mois permet de donner une représentation des régimes de précipitations à long terme. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés (OMM ,2012). Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée (OMM, 2012). Ces indices sont généralement liés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme. Pour certaines stations, l'indice SPI sur 12 mois présente une bonne corrélation avec l'indice de Palmer et les deux indices peuvent mettre en évidence des conditions analogues.(OMM, 2012).

b. Pourcentage de l'indice normale. (Percent of normal index PNI):

Pourcentage de l'indice normale est l'une des méthodes les plus simples et applicables pour enquêter sur l'occurrence des sécheresses, mais les données pluviométriques avec une distribution normale est nécessaire pour la détermination précise de l'intensité de sécheresse avec cette méthode. **Ehsan et al., (2011).**

Le pourcentage des précipitations normales est l'une des mesures les plus simples de précipitations pour un emplacement (Hayes, 2007). Les analyses fondées pourcentage de la normale sont très efficaces lorsqu'ils soient utilisées pour une seule région ou une seule saison. Il est calculé en divisant les précipitations réelles par les précipitations

normale généralement considérée comme une période de 30 ans et en multipliant par 100%. Ceci peut être calculé pour une variété d'échelles de temps, y compris mensuelle, saisonnière, annuelle (Hayes, 2007).

Elle est considérée très efficace pour comparer une seule région ou la saison, par contre elle est facilement mal comprise, car "normale" est une construction mathématique qui ne correspond pas nécessairement aux conditions météorologiques attendues. (Hayes, 2007)

Tableau 03 : classification du Pourcentage de l'indice normale. Percent of normal index (PNI) (Ehsan et al., 2011).

<i>Classification</i>	<i>valeurs de PNI</i>
sécheresse extrême	□40
sécheresse sévère	40-55
sécheresse modérée	55-70
sécheresse légère	70-80
normal	>80

c. L'indice de la Chine-Z : The China-Z Index (CZI):

Le (CZI) est un indice de sécheresse qui a été adopté par à l'Assemblée nationale Centre météorologique de Chine (NMCC) dans les années 1990 (Hong Wu et Michael (2001)). Malheureusement, l'origine de la CZI ne peut pas être facilement documentée. Cet indice est appelé la «Chine-Index A à Z» dans le présent document afin d'éviter toute confusion avec le z-index qui est une partie de la PDSI. Depuis le Centre Climatologique National de Chine (CCN) a été transféré en 1995 en une Agence partenaire au NMCC avec l'Administration météorologique de Chine (CMA, 2000), le CZI à une échelle de temps de 1 mois a été considéré comme le principal indice de surveiller la sécheresse des conditions d'inondation en Chine (Hong Wu et Michael (2001)).

- Autre indices :

- a) Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (Palmer Drought Severity Index) PDSI:

Palmer a développé cet indice en 1965 afin d'évaluer le début, l'intensité et la fin des sécheresses passées et actuelles et d'effectuer la classification des sécheresses. Cet indice est en fonction de l'état du sol, des précipitations et de l'évapotranspiration. McKee et al (1995)

pensent que l'indice de sévérité de Palmer est conçu pour l'agriculture et ne représente pas exactement les effets hydrologiques résultant des sécheresses de longue période. **Khalidi, (2005)**.

Le *PDSI* étant basé sur un bilan hydrique réalisé à partir des précipitations, des températures (permettant d'obtenir l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule de Thornthwaite) et de la réserve utile en eau du sol, il est possible donc, de connaître les valeurs de toutes les variables intervenant dans ce bilan hydrique, à savoir principalement le ruissellement, le taux de recharge, et l'évapotranspiration réelle (**Klein, 2009**)

Des descriptions complètes des équations peuvent être trouvées dans l'étude originale de Palmer (1965) et dans l'analyse de **Alley (1984)**.

En ce qui concerne les inconvénients, ils sont assez nombreux. Tout d'abord, sa définition repose sur de très nombreuses hypothèses ou approximations **Alley, (1984)**, ce qui pose problème au niveau de la fiabilité des résultats obtenus. Par exemple, l'utilisation de la formule de Thornthwaite afin d'évaluer l'évapotranspiration potentielle introduit un biais, puisqu'il est bien connu que l'évapotranspiration ne dépend pas uniquement de la température (Influence de l'éclairement solaire, du vent, *etc.*) (**Klein, 2009**).

Tableau 04 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon PDSI (**Klein, 2009**).

<i>Classifications Palmer</i>	
4,0 ou plus	extrêmement humide
3,0 à 3,99	très humide
2,0 à 2,99	modérément humide
1,0 à 1,99	légèrement humide
0,5 à 0,99	naissante période de mousson
0,49 à -0,49	près de la normale

b.L'Indice d'alimentation des eaux de surface: Surface Water Supply Index (SWSI)

L'Indice d'alimentation des eaux de surface (SWSI) a été développé par Shafer et Dezman (1982) pour le Colorado aux Etats-Unis comme un indicateur des conditions de l'eau de surface. L'objectif de développement de la SWSI était d'intégrer à la fois les caractéristiques hydrologique et climatologiques en un seul indice. Quatre variables d'entrée sont nécessaires pour calculer la SWSI tels que l'eau de la neige, les débits, les précipitations et le volume de réservoir de stockage. La teneur en eau de la neige, précipitations et le volume

réservoir de stockage sont utilisés pour calculer les valeurs pour la SWSI mois d'hiver. Pendant les mois d'été, les débits remplacent l'eau de la neige con. (Barua, 2010).

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

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne. Elle s'exprime par la formule suivante (Jouilil et al., 2013):

$$En(\%) = (P_i - P_n) / P_n \times 100 \dots \dots \dots (13)$$

Une année est dite sèche lorsque cet indice est négatif et humide quand il est positif. Le cumul de l'indice de l'écart en pourcentage à la normale des années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide (Stour et Agoumi, 2008).

d. statistique Z-SCORE: the statistical Z-SCORE :

Z-score statistique ou Score Standard peut être utilisé comme un indice de sécheresse, il fait partie de la CZI. Parfois, le Z-score est confondu avec le SPI par l'utilisateur (Hong Wu et Michael, 2001)

e. Indice de nombre d'écart type : Standard deviation index (SDI)

Cet indice se base sur la comparaison de la pluviométrie actuelle au nombre d'écart type comme indiqué dans le (Tableau 05)

Tableau N° 05 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon le SDI (in Aghrab, 2005).

<i>Classes</i>	<i>Seuils des classes de sévérité</i>
Extrêmement humide	$P_i > P_m + 2\sigma$
Sévèrement humide	$P_m + \sigma < P_i < P_m + 2\sigma$
Modérément humide	$L_s < P_i < P_m + \sigma$
Normale	$L_i < P_i < L_s$
Sécheresse modérée	$P_m - \sigma < P_i < L_i$
Sécheresse sévère	$P_m - 2\sigma < P_i < P_m - \sigma$
Sécheresse extrême	$P_i < P_m - 2\sigma$

P_m : Pluviométrie moyenne

P_i : Pluviométrie de l'année i

σ : Écart type

L_i : Limite inférieure de l'intervalle de confiance

L_s : Limite supérieure de l'intervalle de confiance

f. Déciles :

Déciles ont été mis au point par Gibbs et Maher (1967) en Australie. La distribution est d'abord classée par ordre décroissant de la construction, ensuite elle est divisée en dix

parties, qui sont appelés «déciles», le premier «décile» est la quantité de pluie ne dépasse pas le plus bas 10% des occurrences des précipitations, le second «décile» est la quantité de pluie entre le plus bas 10 et 20% des cas(Aghrab, 2005). Les définitions de ces déciles continue jusqu'à ce que la quantité de pluie identifié par le dixième «décile», qui est le plus grand «décile» dans l'enregistrement à long terme. (Barua , 2010).

Tableau 06 : Classification de la sévérité de la sécheresse selon les déciles(Michael et Hayes ,2007).

<i>Classifications décile</i>	
déciles 1-2	bien inférieur à la normale
déciles 3-4	dessous de la normale
déciles 5-6	près de la normale
déciles 7-8	dessus de la normale
déciles 9-10	bien supérieur à la normale

g. Méthode d'intervalle de confiance (IC) Confidence interval method :

Application de cette méthode est basée sur une distribution qui suit un modèle normal. Pour un les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance sont calculées comme suit (pour un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ de 95 %), selon l'approche consignée dans le Tableau 07: En effet, la limite inférieure de l'intervalle de confiance est considéré comme seuil de sécheresse (Tekaya, 2006). Ce qui signifie que chaque quantité de précipitation inférieure à cette limite est qualifiée comme une période sèche. Également, chaque période a une précipitation comprise entre la borne inférieure et la borne supérieure est considérée normale. Et lorsque la précipitation dépasse la limite supérieure de l'intervalle de confiance, alors la période est considérée comme une période humide. Les seuils qui indiquent la période sèche, normale et humide déterminent la probabilité d'occurrence de chacun de ces trois événements pour chaque période de temps (Stour et Agoumi, 2008) ; (Klajnmic, 2005)

Tableau 07 : Méthode d'intervalle de confiance (Stour et Agoumi , 2008).

<i>Marge d'erreur (E)</i>	<i>Limite supérieure (Ls)</i>	<i>Limite inférieure (Li)</i>
$T (1-\alpha)/2 ; n-1 * [s/n^{1/2}]$	$M+T (1-\alpha)/2 ; n-1 * [s/n^{1/2}]$	$M-T (1-\alpha)/2 ; n-1 * [s/n^{1/2}]$

M : Moyenne estimée

$T_{1-\alpha/2 ; n-1}$: Valeur de la loi T STUDENT de $1- \alpha/2$ à n-1 degré de liberté

$s/n^{1/2}$: Erreur type

s : Écart type de l'échantillon

n : Taille de l'échantillon

h. Rapport à la normale des précipitations (RN) :

C'est un indice simple destiné surtout à une audience générale. Il est efficace lorsqu'on travaille sur une seule location et en seul saison (**Hayes, 1998**). Il est exprimé mathématiquement comme suit

$$RN(\%) = (P_i/P_n) \times 100 \dots \dots \dots (14)$$

P_i est la précipitation de l'année i pour la période, P_n est la précipitation normale pour la même période de temps. Une année sèche est une année dont la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque le RN est inférieur à 100 % (**Rognon, 1996**).

i. Indice de pluviosité (Ip) :

C'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle à la hauteur moyenne annuelle de précipitation.

$$I_p = P_i/P_m \dots \dots \dots (15)$$

Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1. Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne (I_{pm}) qui diffère de la pluviosité en soustrayant 1 de cet indice.

$$I_{pm} = I_p - 1 \dots \dots \dots (16)$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Lorsque la somme des indices plus grande donc il s'agit d'une tendance humide et lorsque la somme des indices est faible, donc la tendance est de type 'sèche'. **Bergaoui et Alouini (2001)**.

j. Analyse fréquentielle :

C'est méthode simple, indépendante des valeurs centrales (moyenne ou médiane). Elle consiste à classer la pluviométrie par ordre croissant, attribuer à chaque valeur un rang de 1 à n (longueur de la série pluviométrique) et calculé la probabilité cumulée ou la fréquence pour chaque valeur par la formule suivante (**Aghrab, 2005**) :

$$P_c = R / n + 1 \dots \dots \dots (17)$$

Avec, P_c est la probabilité cumulée, R est le rang et n est le nombre des années étudiées.

Les pluies annuelles sont classées dans l'ordre croissant suivant leur probabilité au non-dépassement puis divisées en cinq classes (**Benzarti et Hbaibe, 2001**) (Tableau08) :

Tableau 08: Classes de sécheresse en fonction des fréquences (**Benzarti et Hbaibe, 2001**).

<i>Classes</i>	<i>Fréquences ou probabilité au non dépassement</i>
Très sèches	$F < 0,15$
Sèches	$0,15 \leq F < 0,35$
Normales	$0,35 \leq F < 0,65$
Humides	$0,65 \leq F < 0,85$
Très humides	$F \geq 0,85$

Si l'écart à la moyenne (E_m) et l'indice de pluviosité (I_p) indiquent simplement les années sèches et les années humides ainsi que les tendances générales, l'analyse fréquentielle permet en revanche de distinguer parmi les années sèches celles qui sont les plus déficitaires. (**Bergaoui et Alouini 2001**).

3.2) Techniques de prévision de sécheresse :

3.2-1) Chaîne de Markov :

La chaîne de Markov est une technique est largement utilisée pour l'analyse et la modélisation des précipitations (**Javier et Lidia, 1999 ; Mark et George, 2003 ; Lazri et al., 2007 ; Jan et al., 2008 ; Justin, 2008**). Nous l'appliquons à l'échelle annuelle pour déterminer la persistance de la sécheresse, calamité qui pose le plus grave problème à l'agriculture (**Benzarti et Habaieb, 2001**). Le modèle des chaînes de Markov est un modèle stochastique, itératif qui exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille (année précédente) à l'état de l'année en cours (**Agric, 2015**).

a. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 1 :

Rappelons que pour une chaîne de *Markov* du premier ordre, l'état de la variable $E(t)$ à l'instant t ne dépend que de son état à l'instant $(t - 1)$. Ainsi, nous avons quatre situations (**in Meddi et Meddi, 2009**).

$$p_{00} = pr(E(t+1)=0/E(t)=0) \dots \dots \dots (18)$$

$$p_{01} = pr(E(t+1)=1/E(t)=0) \dots \dots \dots (19)$$

$$p_{10} = pr(E(t+1)=0/E(t)=1) \dots \dots \dots (20)$$

$$p_{11} = pr(E(t+1)=1/E(t)=1) \dots\dots\dots(21)$$

où p_{ij} est la probabilité d'aller à l'état j sachant qu'on se trouve à l'état i . Ces probabilités ont été calculées en utilisant la relation suivante.

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \text{ avec } i \text{ et } j = 0 \text{ ou } 1 \dots\dots\dots(22)$$

Où N_{ij} est le nombre de transition de l'état i à l'état j et N_i le nombre de transitions de l'état i vers tout autre état.

b. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 2 :

Rappelons que pour une chaîne de Markov d'ordre 2, l'état de la variable $E(t)$ à l'instant t dépend de son état $E(t-1)$ à l'instant $(t-1)$ ainsi que de son état $E(t-2)$ à l'instant $(t-2)$. La probabilité d'avoir cet état peut s'écrire : **(in Lazri et al., 2006)**.

$$p_{ijk} = pr(E(t) = k/E(t-1) = j, E(t-2) = i) \dots\dots\dots(23)$$

où p_{ijk} représente la probabilité conditionnelle d'avoir un doublet d'états (j,k) succédant au doublet d'états (i,j) et $i, j, k = 0$ ou 1 . Cette probabilité est calculée.

$$p_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{ij}} \dots\dots\dots(24)$$

où N_{ijk} est le nombre de transitions du doublet d'états (i,j) au doublet d'états (j,k) .

3.2-2) Les réseaux de neurones artificiel (RNN) :

Un réseau de neurones est une méthode de calcul inspirée par les études du cerveau humain et des systèmes nerveux **(Chiari et al., 2001)**. Total des neurones d'un réseau de neurones artificiels sont 103 qui sont reliées par des connecteurs 106, tandis que le nombre de neurones et de connexion à un type biologique sont 1011 et 1014 respectivement. **Nasri (2010)**

Le réseau de neurones artificiels (ANN), généralement appelé « réseau de neurones » (RN), est un modèle ou modèle de calcul qui tente de simuler la structure et / ou les aspects fonctionnels de réseaux neuronaux biologiques **(Flores, 2011)**. Un réseau de neurones est un graphe orienté, constitué d'un ensemble d'unités, réalisant des traitements élémentaires,

structurées sous forme de couches successives interconnectées capables d'échanger des informations via des liens structurés (**Tsopze, 2010**). Ainsi, ils peuvent être utilisés pour modéliser les relations complexes entre les entrées et les sorties. (**Touzet, 1992**).

L'application fondamentale de RNA consiste trois étapes: définition d'architecture réseau, l'apprentissage en réseau et la vérification du réseau. L'architecture est définie essentiellement par le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, le type de connexion entre couches (fonctions d'activation), et du type de réseau. Le processus d'apprentissage comprend la fourniture du réseau avec un ensemble d'exemples et en changeant les coefficients de pondération jusqu'à ce que le réseau est en mesure de représenter ainsi la relation entre l'entrée et la sortie des données (**Alfonso and al., 2006**).

Dans les dernières décennies les modèles de réseaux neurones artificiels ont montré une grande capacité à faire face avec hydrologie non-linéaires et les problèmes de ressources en eau. Certains avantages des modèles ANN sont comme suit (**Dastorani et Afkhami , 2011**):

- 1 - Bonne capacité à reconnaître la relation entre l'entrée et la sortie des données ;
2. Résistance considérable à la bruyante et les données peu fiable ;
3. Flexibilité pour faire face aux différentes gammes de données ;
- 4 - Facile à utiliser et obtenir des résultats acceptables par la formation du modèle

3.2-2-a) Historique

De façon générale, on situe le début des réseaux de neurones artificiels en 1943 avec les travaux de Mc Culloch et Pitts (1943) qui montrent qu'un réseau de neurones discret, sans contrainte de topologie, peut représenter n'importe quelle fonction booléenne et donc émuler un ordinateur.

En 1958, Rosenblatt propose le premier algorithme d'apprentissage, qui permet d'ajuster les paramètres d'un neurone. En 1969, Minsky et Papert publient le livre *Perceptrons* dans lequel ils utilisent une solide argumentation mathématique pour démontrer les limitations des réseaux de neurones à une seule couche.

En 1982, Hopfield (**Hopfield, 1984**) propose des réseaux de neurones associatifs et l'intérêt pour les réseaux de neurones renaît chez les scientifiques. En 1986, **Rumelhart, Hinton** et Williams (**David E. Rumelhart et al., 1986**) publient, l'algorithme de la rétro-propagation de l'erreur qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches. À partir de ce moment, la recherche sur les réseaux de neurones connaît un essor fulgurant et les applications commerciales de ce succès académique suivent au cours des années 90. ainsi a l'hydrologie (**Lek et al., 1996**).

3.2-2-b) Définition :

Le réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Network - ANN) fut introduit comme un modèle rudimentaire du traitement de l'information dans le cerveau humain. Ainsi, la structure élémentaire d'un RNA est un réseau de petits nœuds de calcul reliés entre eux par des liens dirigés et pondérés (Gelly, 2017).

Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, soit par plusieurs couches intermédiaires (dites couches cachées) (Dreyfus, 2004).

Habituellement (excepté pour les couches d'entrée et de sortie), chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (Dreyfus, 2004). Chaque neurone reçoit des informations numériques en provenance de neurones voisins ; à chacune de ces valeurs est associée un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque neurone effectue localement un calcul dont le résultat est transmis ensuite aux neurones avals (Schmitt et al., 2001).

3.2-2-c) Architecture d'un réseau de neurones artificiel

L'architecture est un concept très important qui joue un rôle déterminant dans la classification des RNA (Brakni, 2011). Dans la littérature on utilise souvent le mot structure comme synonyme d'architecture (Maren et al. 1990; Hertz et al. 1991). Chaque architecture a sa propre organisation qui est adaptée à des applications bien spécifiques (Sarle 1994; Haykin 1994).

3.2-2-c-1) Réseaux monocouche :

Réseaux monocouche est un réseau très simple grâce à sa composition d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie (figure 2) sans avoir de couche cachée, il obéit généralement un apprentissage supervisé selon la règle de correction de l'erreur ou selon la règle de Hebb (Hebb, 1949).

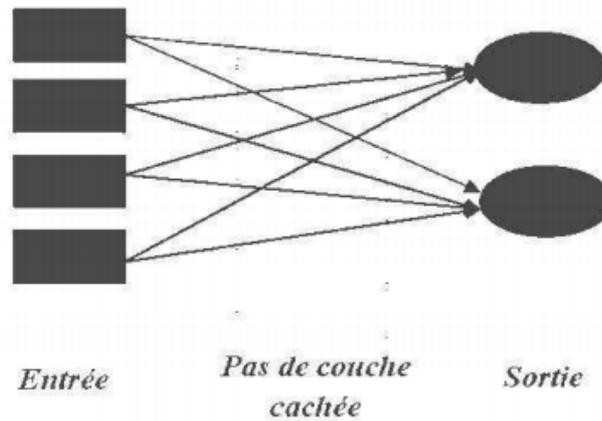


Figure 2 : réseau de neurones monocouche (Davalò et Naim, 1989).

3.2-2-c-2) Réseaux multicouche :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales (John Flores, 2011). La première couche qui forme le vecteur des données d, entrée est appelée couche d'entrée tandis que la dernière couche qui produit les résultats est appelée couche de sortie (Lippmann, 1987 ; Hagan et al., 1996). Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées (Mehrotra and al., 1996)

a) Réseau multicouche classique :

Dans un réseau multicouche classique (figure 03), il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones de la couche aval. Tous les neurones de la couche amont sont connectés à tous les neurones de la couche aval (Gideon, 2009).

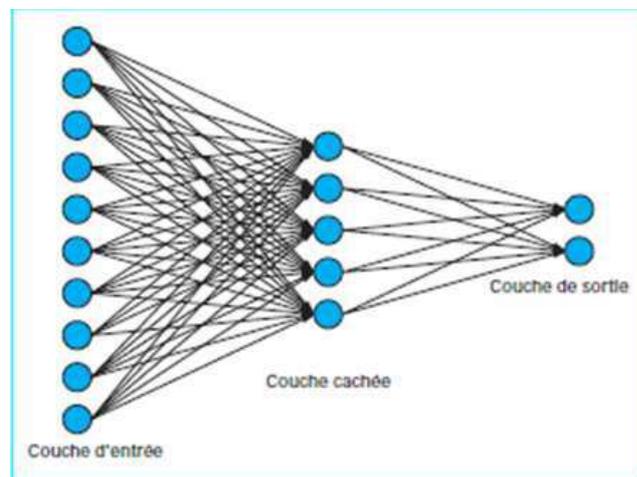


Figure 03 : Réseau multicouche classique (Gideon, 2009)

b) Réseau à connexions locales :

C'est aussi un réseau multicouche, mais tous les neurones d'une couche amont ne sont pas connectés à tous les neurones de la couche aval. Nous avons donc, dans ce type de réseau de neurones un nombre de connexions moins important que dans le cas du réseau de neurones multicouche classique (Mehrotra et al., 1996)

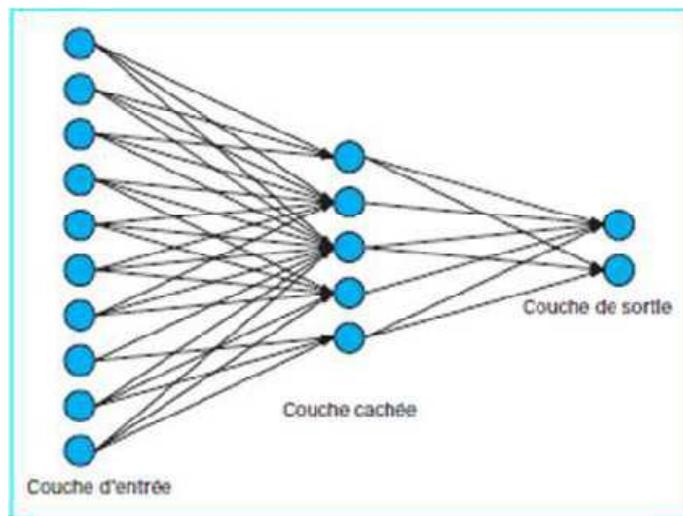


Figure 4 : Réseau à connexion locale(Mehrotra et al., 1996)

c) Réseau à connexions récurrentes :

Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Les réseaux à connexions récurrentes sont des réseaux plus puissants car ils sont séquentiels plutôt que combinatoires comme l'étaient ceux décrits précédemment. La rétroaction de la sortie vers l'entrée permet à un réseau de ce type de présenter un comportement temporel (Mehrotra et al., 1996)

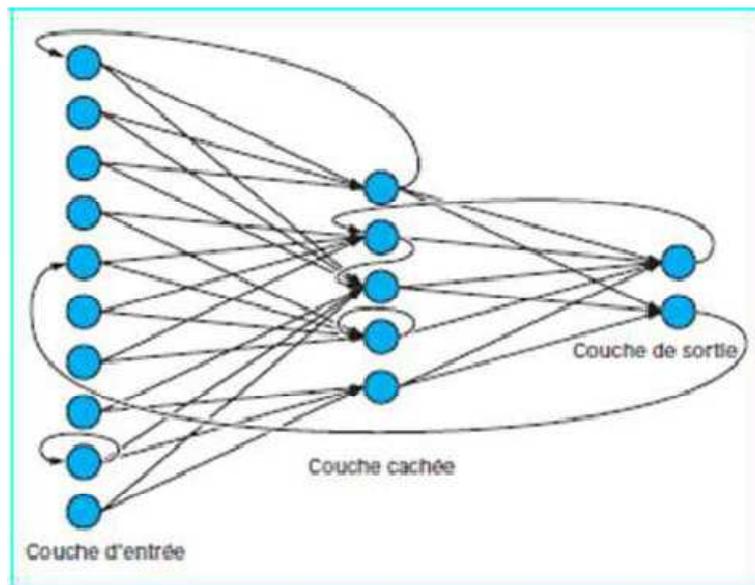


Figure 05 : Réseau à connexions récurrentes (Mehrotra et al., 1996)

3.2-2-d) L'apprentissage des réseaux de neurones :

L'apprentissage est une étape très importante du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié itérativement jusqu'à l'obtention du comportement désiré, et ce par l'ajustement des poids (connexion ou synapse) des neurones à une source d'information bien définie (Hebb 1949; Grossberg 1982; Rumelhart et al. 1986). L'apprentissage consiste également à extraire des conformités parmi les données utilisées pour l'entraînement du réseau mais l'objectif essentiel de l'apprentissage est la résolution du problème par la prévision, la classification ... etc (Weiss et Kulikowski 1991). Pour un RNA, l'apprentissage peut être regardé également comme étant le processus de la mise à jour des poids (connexion) au sein du réseau dans le but d'ajuster la réponse du réseau à l'expérience et aux exemples. Il existe plusieurs types de règles d'apprentissage qui peuvent être rassemblées en deux catégories qui sont l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé

a) Apprentissage supervisé :

Dans ce type d'apprentissage, (Figure 06) on cherche à imposer au réseau un (Brakni, 2011).fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien données (choisie par l'opérateur) et ce en modifiant les poids synaptiques (Brakni, 2011). Le réseau se comporte alors comme un filtre dont les paramètres de transfert sont ajustés à partir des couples entrée-sortie présentés (Hassoum 1995).

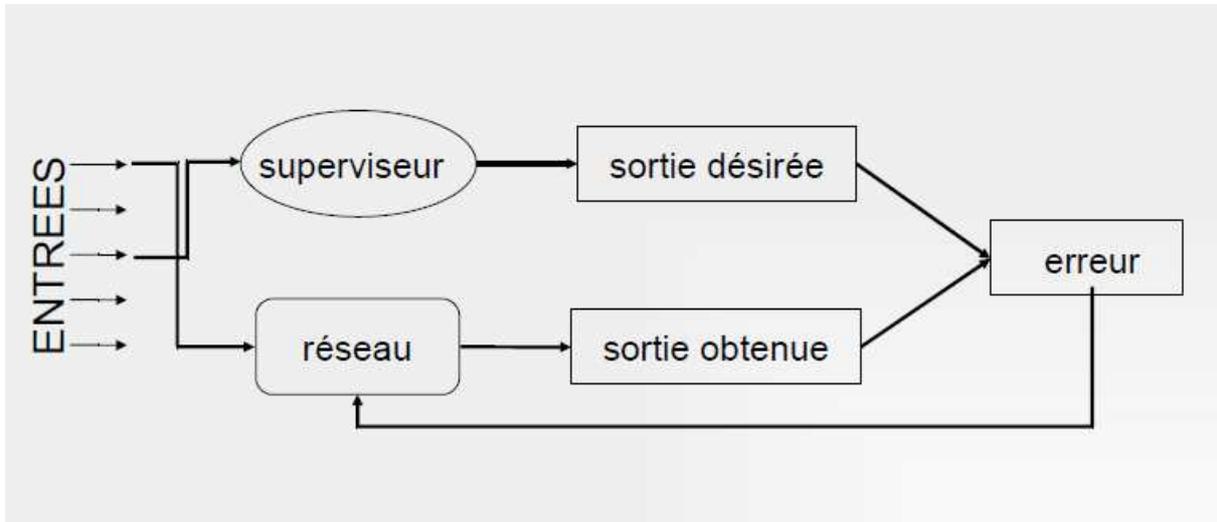


Figure 06 : réseau a apprentissage supervisé (Mehrotra et al., 1996)

La plupart des algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones sont des algorithmes d'optimisation : ils cherchent à minimiser, par des méthodes d'optimisation non linéaire, une fonction de coût, qui constitue une mesure de l'écart entre les réponses réelles du réseau et ses réponses désirées (Flores, 2011).

Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en fonction du gradient de la fonction de coût : le gradient est estimé par une méthode spécifique aux réseaux de neurones, dite méthode de retro propagation, puis il est utilisé par l'algorithme d'optimisation proprement dit (Bengio, 2004). Les poids sont initialisés aléatoirement avant l'apprentissage, puis modifiés itérativement, jusqu'à l'obtention d'un compromis satisfaisant entre la précision de l'approximation sur l'ensemble d'apprentissage et la précision de l'approximation sur un ensemble de validation, distinct du précédent (Bengio, 2004)

b) Apprentissage non supervisé :

Contrairement à l'apprentissage supervisé, seules les valeurs d'entrée sont disponibles dans ce type d'apprentissage non supervisé (Figure 07) qui est appelé aussi « apprentissage par compétition ». Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto adaptation du réseau afin d'engendrer des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrée similaires (Brakni, 2011). L'apprentissage non-supervisé correspond au cas où aucune cible n'est prédéterminée (Dreyfus, 2005).

Ainsi, l'ensemble d'entraînement ne contient que des entrées et ne définit pas explicitement la nature de la fonction (f) qui doit être retournée par l'algorithme d'apprentissage (Flores ,2011)..

Dans l'apprentissage non supervisé, le réseau modifie ses paramètres en tenant compte seulement des informations locales. Ces méthodes n'ont pas besoins de sorties désirée préétablies. Les réseaux utilisant cette technique sont appelés réseaux a dynamique autonome et sont considères comme des détecteurs de régularité, car le réseau apprend en détectant les régularités dans la structure des motifs d'entrée et produit la sortie la plus satisfaisante (Bessai et al., 2004).

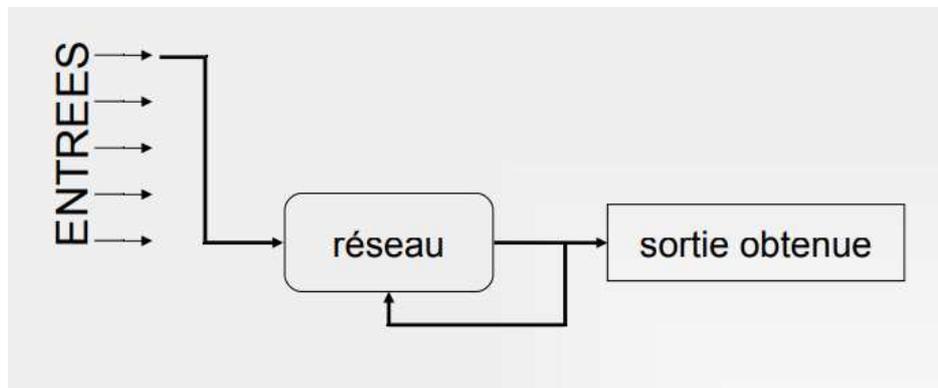


Figure 07 : réseau a apprentissage non supervisé(Bessai et al 2004).

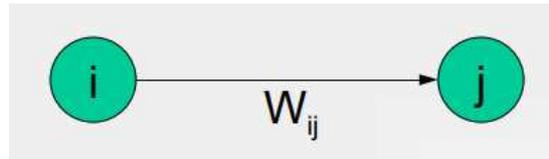
c) Apprentissage hybride :

Apprentissage hybride_a été développé par Hecht-Nielsen (1987) et étudié plus avant par (Huang et Lippmann, 1988). Il a été utilisé avec succès pour l'approximation des fonctions, l'hétéro-association et la compression des données, et sa formation se produit beaucoup plus rapidement que la rétro propagation (Mehrotra et., al 1996).

Certains auteurs utilisent le terme d'apprentissage hybride pour parler d'un couplage 'supervise non supervise' ; dans ce cas, il s'agit d'un réseau qui met en parallèle ou en serie un réseau entraine en mode supervise et un autre en mode non supervise (Dreyfus ,2005).

- Règles d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'a l'obtention du comportement désire (Touzet, 2016). Cette modification consiste a modifier les poids des connexions entre les neurones en suivant certaines (Bessai et al 2004).. La loi de Hebb (1949) s'applique aux connexions entre neurones, comme le représente :



(i) le neurone amont, (j) le neurone aval et (w_{ij}) le poids de la connexion.

Elle s'exprime de la façon suivante :

"Si 2 cellules sont activées en même temps alors la force de la connexion augmente".

La modification de poids dépend de la coactivation des neurones pré synaptique et postsynaptique (**Bessai et al 2004**).

x_i et x_j sont respectivement les valeurs d'activation des neurones i et j.

w_{ij} (dérivée partielle du poids) correspond à la modification de poids réalisée.

La loi de Hebb (1949) peut être modélisée par les équations suivantes :

$w(t+1)$ est le nouveau poids

$w_{ij}(t)$ l'ancien

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + w_{ij}(t) \dots \dots \dots (25)$$

$w_{ij}(t) = x_i \cdot x_j$ (l'activité est modélisée comme étant le produit des deux valeurs d'activation)

d) Algorithme d'apprentissage :

L'algorithme d'apprentissage modifie de façon itérative (petit à petit) les poids pour adapter la réponse obtenue à la réponse désirée (**Touzet, 2016**). Il s'agit en fait de modifier les poids lorsqu'il y a erreur seulement (**Dreyfus, 2005**) :

1/ Initialisation des poids et du seuil S à des valeurs (petites) choisies au hasard.

2/ Présentation d'une entrée $E_1 = (e_1, \dots, e_n)$ de la base d'apprentissage.

3/ Calcul de la sortie obtenue x pour cette entrée : $a = \sum (w_i \cdot e_i) - S$

la valeur de seuil est introduite ici dans le calcul de la somme pondérée

$$x = \text{signe}(a) : \begin{cases} \text{si } a > 0 \text{ alors } x = +1 \\ \text{sinon } a \leq 0 \text{ alors } x = -1 \end{cases} \dots \dots \dots (26)$$

4/ Si la sortie (x) est différente de la sortie désirée (d) pour cet exemple d'entrée (E_1) alors

Modification des poids (μ est une constante positive, qui spécifie le pas de modification des poids) : $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mu \cdot (x_i \cdot x_j)$

5/ Tant que tous les exemples de la base d'apprentissage ne sont pas traités correctement

(i.e. modification des poids), retour à l'étape 2.

4) Conclusion :

Les indices de sécheresse sont des outils d'analyse puissants pour caractériser les événements dans l'espace et dans le temps.

La chaîne de Markov est un modèle stochastique très largement utilisé dans le domaine de l'hydrologie, particulièrement dans l'analyse et la modélisation des précipitations ainsi dans la prévision de la sécheresse.

Les réseaux de neurones artificiels, inspirés du comportement du cerveau humain, permettent de créer de l'intelligence artificielle. Ils servent à prédire, à identifier et à classifier les données. L'apprentissage, moteur essentiel du système, leur permet d'assimiler un traitement d'information à travers une fonction et de le reproduire pour les données qui lui seront ensuite présentées. Les réseaux de neurones sont beaucoup utilisés en Hydrologie particulièrement en prévision de la sécheresse, par ce que, est outil d'aide à la décision.

Chapitre III

Etude d'homogénéité des données

1) **Introduction :**

La compréhension des processus intervenant dans le cycle de l'eau ainsi que l'étude de leurs variations spatiales et temporelles nécessitent de disposer de données. Celles-ci sont essentielles et constituent un préalable à toute analyse hydrologique

Le principe de l'homogénéisation est d'obtenir des séries exemptes de variations artificielles (changement des conditions de mesure) tout en préservant leur variabilité climatique. Le processus d'homogénéisation ne pouvant être réalisé que sur des séries longues et relativement continues, le choix de la période a été fait en fonction de la disponibilité des données, soit 1960-2010. Ce travail a abouti à une base de données mensuelle pluviométrique sur la période 1960-2010.

2) **Contrôle et vérification des données :**

2.1) **Contrôle des données par l'homogénéisation des séries des précipitations :**

Avant l'utilisation des données de précipitations dans ce travail, il est important de contrôler la fiabilité et la précision de ces dernières. Le contrôle de la validité des données d'observation est un travail très important pour toute une analyse correcte, malgré les nombreux contrôles manuels intervenant dans la chaîne de traitement des données climatologiques.

La question de l'homogénéité, ou de non homogénéité des observations est un problème important compte tenu, des conséquences que peut entraîner l'utilisation de séries non homogènes, considérées en fait comme homogènes (**Khaldi 2005**). Une série est dite homogène, si les observations qui la composent ont été observées de la même façon et sont issues de la même population. Pour les statisticiens, la série de données est dite homogène, si les propriétés statistiques de l'erreur de mesure affectant ces données sont restées invariables au cours de la période d'observation (**Khaldi 2005**).

D'une façon générale, les éléments climatiques dans le temps ne se produisent pas de la même façon et la série correspondante n'est pas purement stationnaire (**Khaldi 2005**).

Les causes perturbatrices les plus courantes de l'homogénéité des observations sont(**Sari. A, 2002**) :

1. Erreurs fortuites de lecture de l'éprouvette ;
2. Erreurs dues à l'évaporation;
3. débordement du pluviomètre quand les pluies est très intense ;

4. pluviomètre percé ;
5. Pertes d'eau pendant le transvasement de l'éprouvette dans le seau ;
6. pluviomètre sous un arbre, ect (**Sari. A, 2002**).

L'utilisateur des données doit connaître l'historique des stations d'observations, ce qui permettra d'expliquer les causes de l'hétérogénéité lorsqu'elle existe. Cet historique comprend le nom de la station, les coordonnées, les périodes, le personnel d'exploitation et les détails sur son équipement (**Sari. A, 2002**).

Les méthodes citées ci-dessous ont été utilisées pour le comblement de lacunes et l'étude de l'homogénéité.

2.1.a) Comblement des lacunes à l'aide du programme "Bouche trous"

Pour les besoins de l'étude, nous avons procédé au comblement des lacunes en utilisant la technique développée par J.P. Laborde en 1998, elle est basée sur la méthode de 'bouche trou' en utilisant le logiciel HYDROLAB.

2.1.b) Homogénéisation des données des précipitations par la Méthode du double cumul

Après le comblement des lacunes et pour voir l'homogénéisation des données pluviométriques utilisées dans cette étude, nous adoptons la méthode de double cumul pour étudier l'homogénéisation des données de précipitation.

La Méthode du double cumul permet de détecter la non-homogénéité d'une série de mesure et de la corriger. La méthode consiste à comparer les pluies (ou toute autre variable) cumulées 'une station A, à propos de laquelle on éprouve des doutes quand à son homogénéité, avec des pluies cumulées d'une station B dont les mesures sont jugées homogènes. (**Sari. A, 2002**).

$$X(t) = \sum_{i=0}^t x(i) \quad \text{et} \quad Y(t) = \sum_{i=0}^t y(i) \dots \dots \dots (27)$$

Les figures qui représentent la méthode de double cumul (Annexe, Figure 02), montrent qu'il n'y a aucun changement de l'exploitation des stations de la zone d'étude. En termes de fiabilité de données pluviométriques, la plupart des stations pluviométriques ont présenté une bonne crédibilité. Nous remarquons d'après les coefficients de détermination, une bonne corrélation entre les séries pluviométriques. Donc, on peut dire que ces séries sont homogènes.

2.2) Choix des stations représentatives pour les plaines étudiées :

Pour bien représenter les plaines (une station pour chaque plaine), la pluviométrie moyenne mensuelle zonale sur chaque plaine est identifiée à partir des stations pluviométriques entières sur la plaine ou à proximité, en utilisant la méthode des polygones de Thiessen. Ces valeurs sont utilisées pour tous les calculs de notre étude (Tableau 10) :

2.2.a) La méthode des polygones de Thiessen : Figure 08

C'est une méthode arithmétique dans la quelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence définie géométriquement. Cette méthode ne tien compte que de la distribution spatiale en plan des stations pluviométriques. Elle ne tien compte ni de la topographie ni d'autre facteurs qui pourraient influencer la distribution spatiale de la pluie (Sari, A, 2002).

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i P_i}{S} \dots \dots \dots (28)$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,

S : aire totale du bassin,

P_i : précipitation enregistrée à la station i ,

S_i : superficie d'influence du polygone associée à la station i .

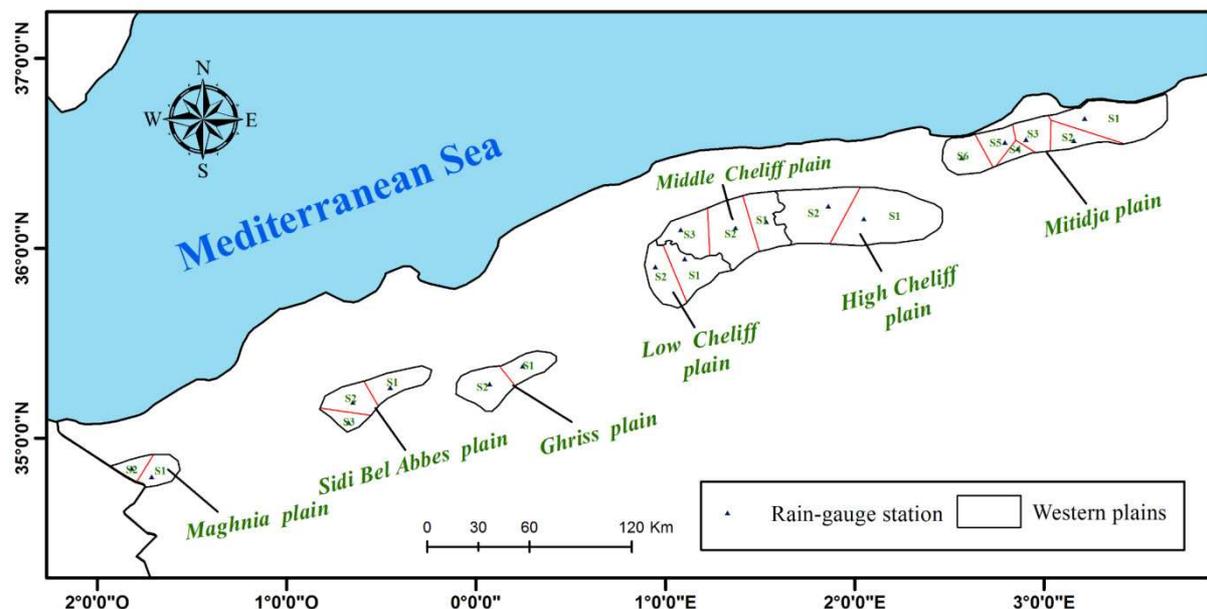


Figure 08 : l'application de la méthode des polygones de Thiessen sur les plaines de la région d'étude

Le tableau au-dessous récapitule le nombre de stations utilisées pour chaque plaine lors de l'application de la méthode de Polygone de Thiessen avec les caractéristiques statistiques.

Tableau 10 : les caractéristiques statistiques de la Moyenne annuelles pour les plaines étudiées

<i>Plaine</i>	<i>Nb.s.p</i>	<i>moyenne</i>	<i>écart type</i>	<i>Médiane</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
Mitidja	06	713,9	156,1	706,2	1082.3	448.7
High Cheliff	02	419,0	89,9	432,5	651.6	178.5
Middle Cheliff	03	382,3	85,7	379,9	600.5	227.5
Low Cheliff	02	348,9	70,2	343,2	483.3	208.5
Ghriss	03	322,9	76,0	308,8	548.6	210.1
Sidi Bel Abbes	04	344,6	84,6	360,1	561.7	195
Maghnia	02	298,4	82,7	287,8	501.3	173.7

Nb.s.p : Nombre des stations par plaine.

2.3) Evaluation de l'ajustement de la loi :

Pour connaître la loi qui s'ajuste à nos données pluviométriques, nous avons utilisé deux méthodes, la première c'est la méthode d'Anderson-Darling et la deuxième méthode consiste à ajuster nos séries pluviométriques à une loi racine-normale..

2.3.a) La statistique d'Anderson-Darling :

La statistique d'Anderson-Darling (AD) détermine dans quelle mesure les données suivent une distribution spécifique. Généralement, plus la distribution s'ajuste correctement aux données, plus cette statistique est faible.

La statistique d'AD est utilisée pour calculer la valeur de p du test d'adéquation de l'ajustement, ce qui vous aide à identifier la loi qui s'ajuste le mieux aux données. Par exemple, la statistique d'AD est calculée pour chaque loi lorsque vous exécutez la commande Identification de loi individuelle. Les valeurs de p calculées à partir de cette statistique permettent d'identifier le modèle de loi à utiliser pour une analyse de capacité ou une analyse de fiabilité. La statistique d'AD est également utilisée pour vérifier si un échantillon de données provient d'une population avec une distribution spécifique. Par exemple, vous pouvez avoir besoin de vérifier que vos données sont conformes à l'hypothèse de normalité pour un test t.

Les hypothèses du test d'Anderson-Darling sont les suivantes :

- H_0 : les données suivent une distribution spécifiée.
- H_1 : les données ne suivent pas une distribution spécifiée.

Si la valeur de p du test d'Anderson-Darling est inférieure au seuil de signification choisi (généralement 0,05 ou 0,10), vous pouvez en conclure que les données ne suivent pas la distribution spécifiée.

Si vous comparez l'ajustement de plusieurs lois, celle ayant la valeur de p la plus élevée est généralement celle qui est la mieux ajustée aux données. Si les lois présentent des valeurs de p similaires.

Après l'application de la méthode d'Anderson-Darling sur notre série pluviométrique, les résultats sont mentionnés dans le (Tableau 11) et après la comparaison entre les valeurs de p du test d'Anderson-Darling pour les différentes lois NORMAL, GAMMA et PEARSON III, nous avons constaté que la majorité des données des stations sui à une loi Normal.

2.3.b) Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine-normale

Les études antérieures (Chaumont, 1971; A.N.R.H., 1993; Mébarki, 2005) ont montré que la loi racine –normale ajuste bien les séries pluviométriques du nord de l'Algérie (les pluies annuelles et mensuelles)

L'expression de la loi racine-normale est :

$$F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} \dots\dots\dots(29) \quad \text{Avec : } u = \frac{\sqrt{P}-\sqrt{\bar{P}}}{\sigma\sqrt{p}} \dots\dots\dots(30)$$

Où :

$F(P)$: probabilité qu'une valeur quelconque P soit inférieure ou égale a p ;

u : variable réduite de Gauss, avec P : pluie en dixièmes de millimètres

\bar{P} : moyenne des racines carrés de la série d'observations ;

$\sigma\sqrt{p}$: Écart -type des racines carrées de la série d'observations.

Tableau 11 : comparaison entre les valeurs du test d'Anderson-Darling

<i>Nom de la station</i>	AD2		
	<i>NORMAL</i>	<i>GAMMA</i>	<i>PEARSON III</i>
AMEUR AIN	4,899	5,431	5,431
ARRABAA	0,683	10,65	10,65
BNI MARED	0,931	21,692	21,692
BOUFARIK	2,723	8,177	8,177
DAR EL BEIDHA	1,012	5,968	5,968
FER CHEFAL	0,857	4,56	4,56
MENACEUR	0,347	25,14	25,14
OUED AILAYGUE	2,573	18,807	18,807
AIN BOUCIF	0,819	14,555	14,555
AIN DEFLA	1,977	23,189	23,189
BENAIRIA	1,393	21,195	21,195
CHLEF	1,749	2,454	2,454
DEREGUE	2,567	11,593	11,593
OUED FODDA	2,481	4,534	4,534
FRENDIA	4,122	2,605	2,605
GHRIB	0,6	9,153	9,153
KHEMIS MILIANA	1,548	14,262	14,262
KHEMISTI	3,694	2,652	2,652
PONTEBA	1,118	25,662	25,662
SI TAYEB	2,235	26,311	26,311
SIDI LAKHDER	0,862	30,829	30,829
SIDI MDJAHED	1,798	6,063	6,063
THENIA EL HAD	3,533	19,761	19,761
AIN FERS	5,556	3,301	3,301
BOUHENI	2,086	22,589	22,589
BRAHIM	1,993	7,686	7,686
MOUSSA	6,223	2,281	2,281
MATMOUR	4,828	18,923	18,923
SIDI BEL ABBES	1,085	4,396	4,396
BNI BAHDEL	1,086	4,229	4,229
BNI AOUSIN	2,728	1,579	1,579
CHOULY	3,022	2,768	2,768
MAGHNIA	1,085	3,573	3,573

Cette loi est caractérisée par deux paramètres :

*La moyenne des racines carrées des pluies mensuelles (\sqrt{P});

*L'écart- type des racines carrées des pluies mensuelles ($\sigma\sqrt{p}$).

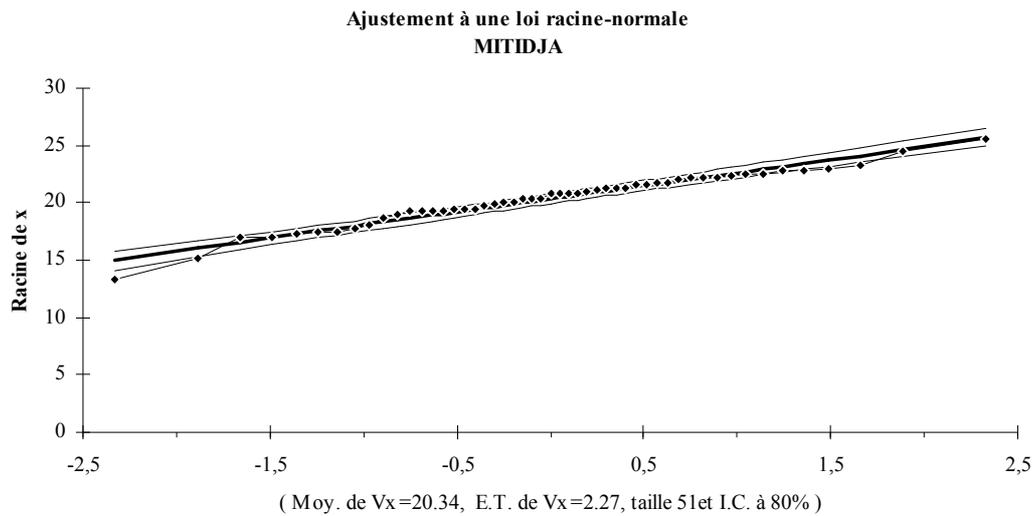


Figure 09: courbe d'ajustement de loi de racine-normal sur les données de précipitation pour la plaine de Mitidja.

La loi racine-normale s'adapte pour la majorité des plaines (Figure 09) avec une pluviométrie annuelle importante que les plaines peu pluvieuses (Ghriss et BAS Cheliff). Les graphiques montrent que la loi racine-normale ajuste bien sur les données pour les des différentes plaines. (Figure09) pour la plaine de Mitidja, les autres plaines sont dans l'annexe (figures 03).

3) Conclusion :

Toutes les études qui portent des variables climatiques nécessite une correction des inhomogénéités dans les séries climatiques. Plus particulièrement, des séries de précipitations de qualité permettront de prendre des décisions basées sur des données fiables dans différentes recherches sur la sécheresse. Le choix de la méthode optimale à utiliser dépend fortement des caractéristiques statistiques de la station.

Chapitre IV
**Etude de la variabilité
climatique dans les sept
plaines**

1) Introduction :

La variabilité climatique désigne une transformation à court terme du climat d'un lieu donné. Une mesure de cette transformation et les modifications que subissent des paramètres climatiques comme la température, le vent et les précipitations (**Hermés, 2008**).

Les climatologues distinguent entre les concepts de la variabilité du climat et le changement climatique (**Hermés, 2008**). La variabilité du climat se réfère généralement à court ou à moyen terme aux fluctuations autour de l'état moyen du climat sur les échelles de temps allant de quelques années (15 à 30 ans). Le changement climatique, d'autre part, se réfère à un changement fondamental dans l'état moyen du climat qui se rapporte généralement aux tendances à plus long terme. Bien que les projections futures des changements climatiques soient souvent données comme des valeurs moyennes, les climatologues soulignent que ce changement ne peut pas être présumé avoir lieu comme un vrai linéaire progressif hausse (**Hermés 2008**). A court terme, la variabilité du climat et la fréquence des événements climatiques extrêmes sont prévues pour être modifiées dans le cadre de la physique des conséquences des changements climatiques à long terme (**Hermés 2008**).

L'évolution naturelle du climat au cours des derniers millions d'années se caractérise par des alternances des périodes froides et chaudes qui s'organisent en cycles de différentes périodicités notamment en fonction des paramètres astronomiques. Il est admis que les activités humaines actuelles, qui engendrent des émissions de gaz à effet de serre, sont susceptibles de perturber cette évolution naturelle des climats (**Githeko et al, 2000**).

2) Caractérisation du climat :

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporative et les températures, ceux qui sont les plus couramment utilisés sont les suivants (**Bechini et Radjai, 2013**):

2.1) Diagramme ombrothermique :

Un mois sec se définit, selon (**Bagnouls et Gaussen, 1953, 1957**) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$). Ainsi, on constate que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gaussen permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois de

novembre qui se termine au mois de mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de juin jusqu'au mois d'octobre Figure 10.

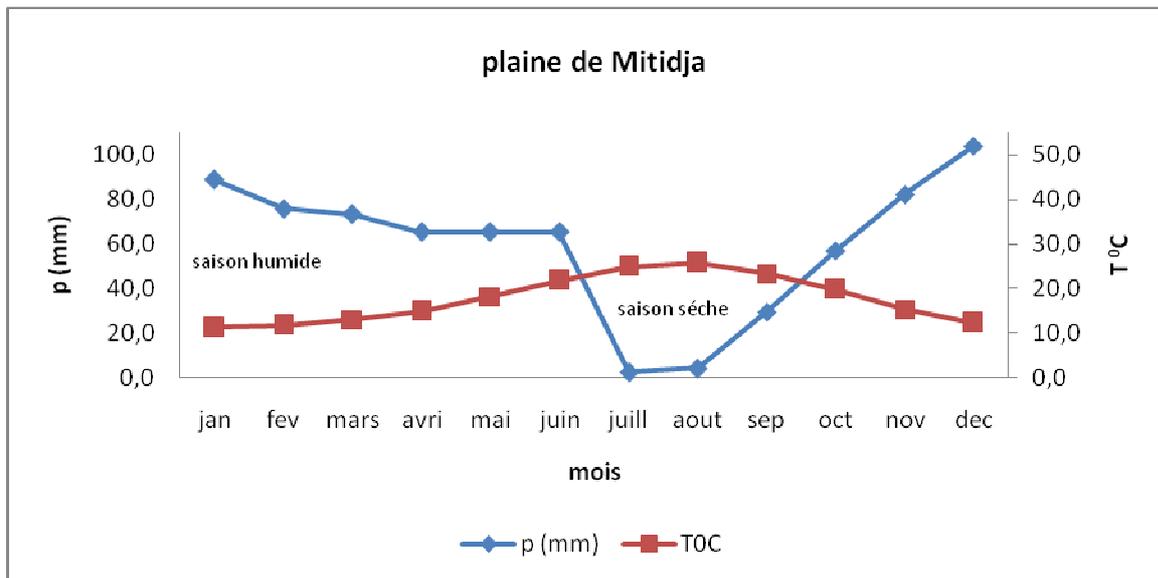


Figure 10 : Courbe ombrothermique de la plaine de Mitidja.

2.2) Indice de De Martonne:

Cet indice est fonction des températures et des précipitations, il est calculé par la relation Suivante :

$$I = P/T+10.....(31)$$

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C

Tableau 12 : la classification de climat selon l'indice Maratonne pour les sept plaines

plaine	Indice de Maratonne	Classification d'après Maratonne
Mitidja	25,8	climat semi-humide
Haut Cheliff	14.4	climat semi-aride
Moyen Cheliff	12.7	climat semi-aride
Bas Cheliff	12,0	climat semi-aride
Ghriss	12,3	climat semi-aride
Sidi Bel Abbes	11,5	climat semi-aride
Maghnia	11.05	climat semi-aride

Selon l'indice de Maratonne, la plaine de la Mitidja c'est la seule plaine qui est caractérisé par un climat tempéré, par contre toutes les autres plaines subissent un climat semi-aride

2.3) Indice de Paul Moral (1964):

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C. Cet indice permet de dire :

Si $IM < 1$ on a climat sec et si $IM > 1$ on a climat humide.

$$IM = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \dots\dots\dots(32)$$

Tableau 13 : la classification du climat selon l'indice de Paul Moral pour les sept plaines

<i>plaine</i>	<i>Indice de Paul Moral</i>	<i>Classification d'après Paul Moral</i>
Mitidja	2,1	climat humide
Haut Cheliff	1.13	climat humide
Moyen Cheliff	0.95	climat sec
Bas Cheliff	0,9	climat sec
Ghriss	0.88	climat sec
Sidi Bel Abbes	1,0	climat sec
Maghnia	0.93	climat sec

D'après le tableau 13 et selon l'indice de Paul Moral, on observe que la majorité des plaines sont caractérisées par un climat sec sauf les plaines de Mitidja et Haut Cheliff ou le climat est classifié par un climat humide.

3) Analyse de température :

L'analyse de l'évolution des températures est très importante. A l'échelle mondiale de nombreux chercheurs s'intéressent à la hausse des températures de ces dernières années. L'analyse de l'évolution des températures permet de déterminer, d'une part l'influence du réchauffement global sur le réchauffement local et, d'autre part, la concordance entre la tendance des températures et la tendance des précipitations dans la zone d'étude (**Kouassi et al., 2010**).

3.1) Analyse statistiques des températures :

L'évolution annuelle des températures (figure 11) montre que les plaines de Mitidja, Ghriss et de Sidi Bel Abbes présentent pratiquement les mêmes variations avec une moyenne de l'ordre 17 C⁰ (Tableau 14). Les températures annuelles enregistrées dans le Bas Cheliff sont d'environ 19 C⁰.

Les plaines de Ghriss et de Sidi Bel Abbes enregistrent les mêmes températures maximales et minimales qui sont de l'ordre de 15 C⁰ et 20 C⁰ successivement.

L'écart type est faible dans les plaines de Mitidja et Sidi Bel Abbes.

Tableau 14 : paramètres statistiques des températures

Plaines	Moyenne	Médiane	Variance	Ecart-Type	Minimum	Maximum	Coefficient d'asymétrie	Etendue
Mitidja	17,65	17,61	0,35	0,59	16,61	18,87	0,26	2,26
Bas Cheliff	19,08	19,08	3,31	1,82	18,54	24,36	0,51	15,82
Ghriss	17,46	17,43	1,14	1,07	15,58	20,43	0,69	4,85
Sidi Bel abbes	17,63	17,54	0,98	0,99	15,57	20,43	0,55	4,86

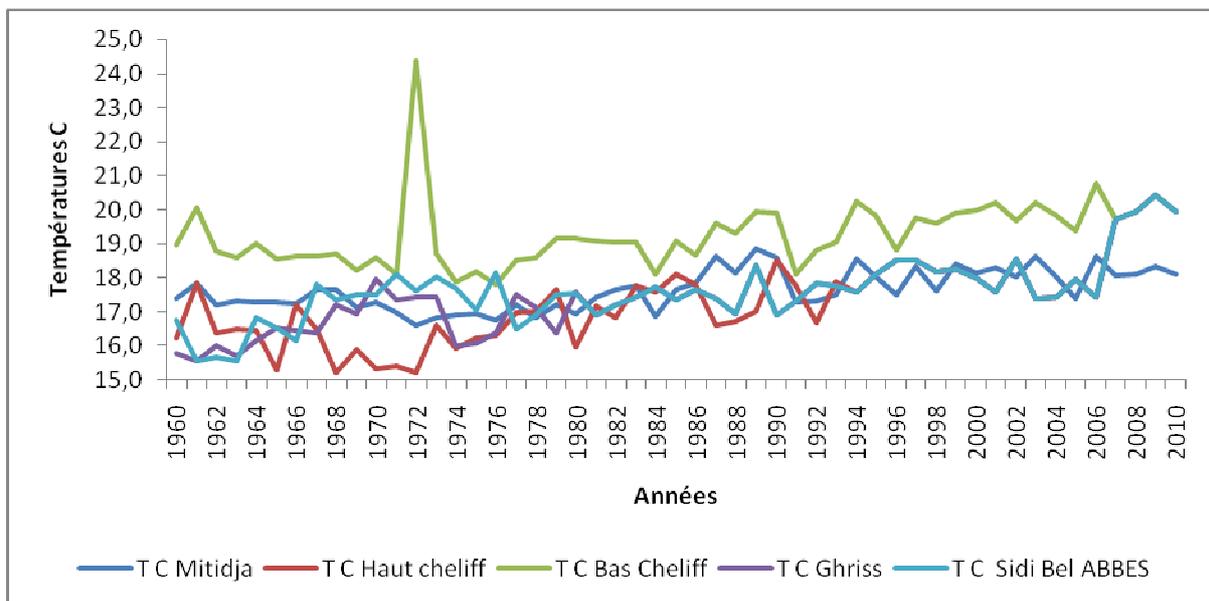
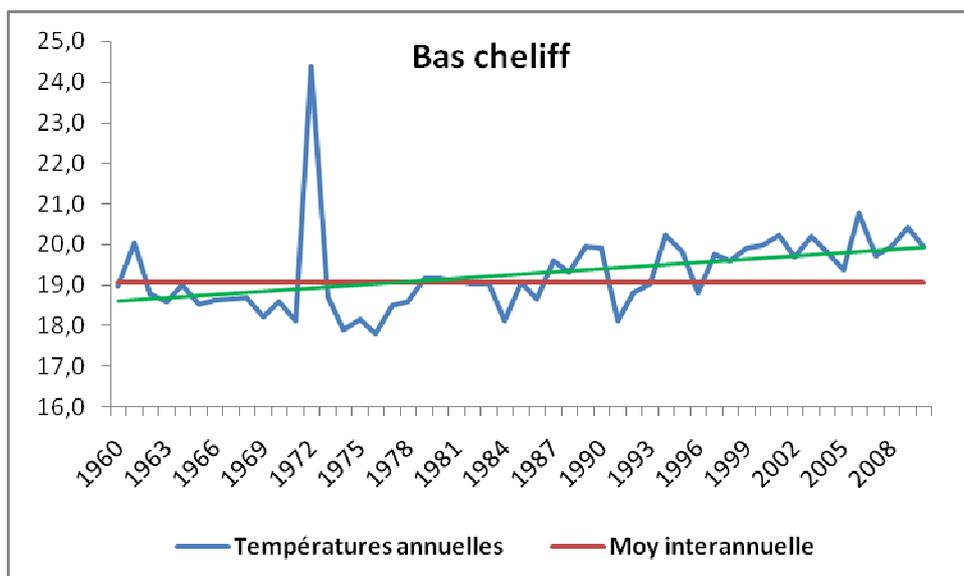
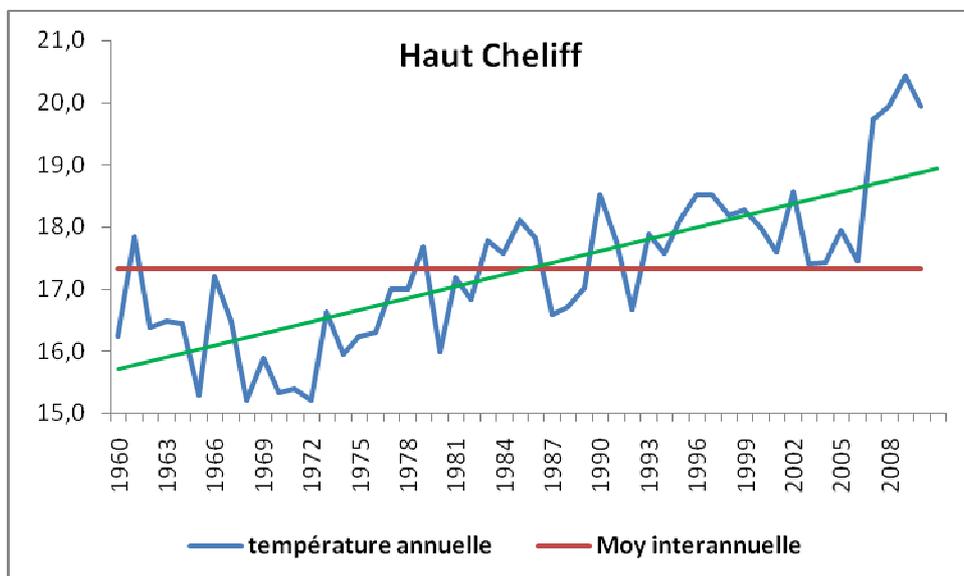
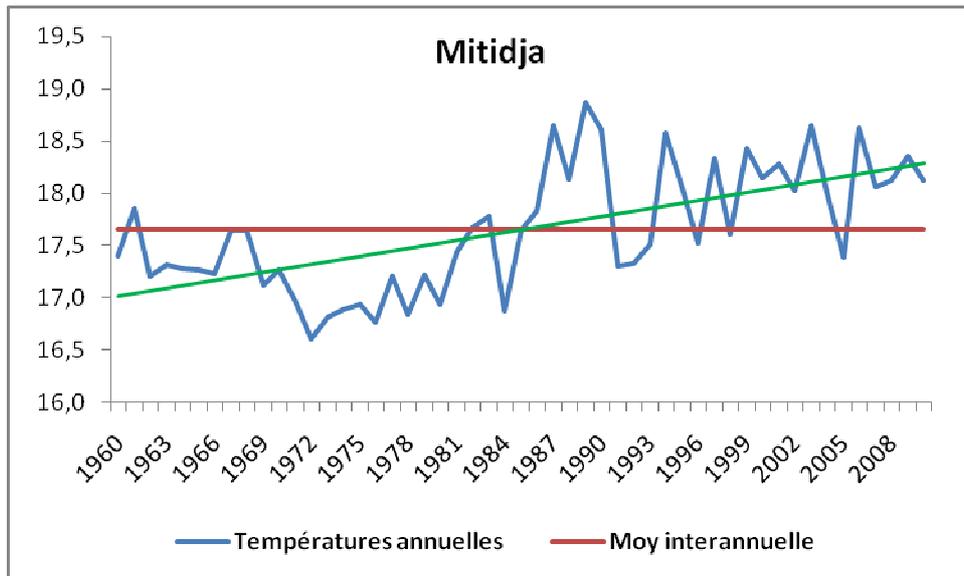


Figure 11: évolution des températures annuelles (1960-2010)



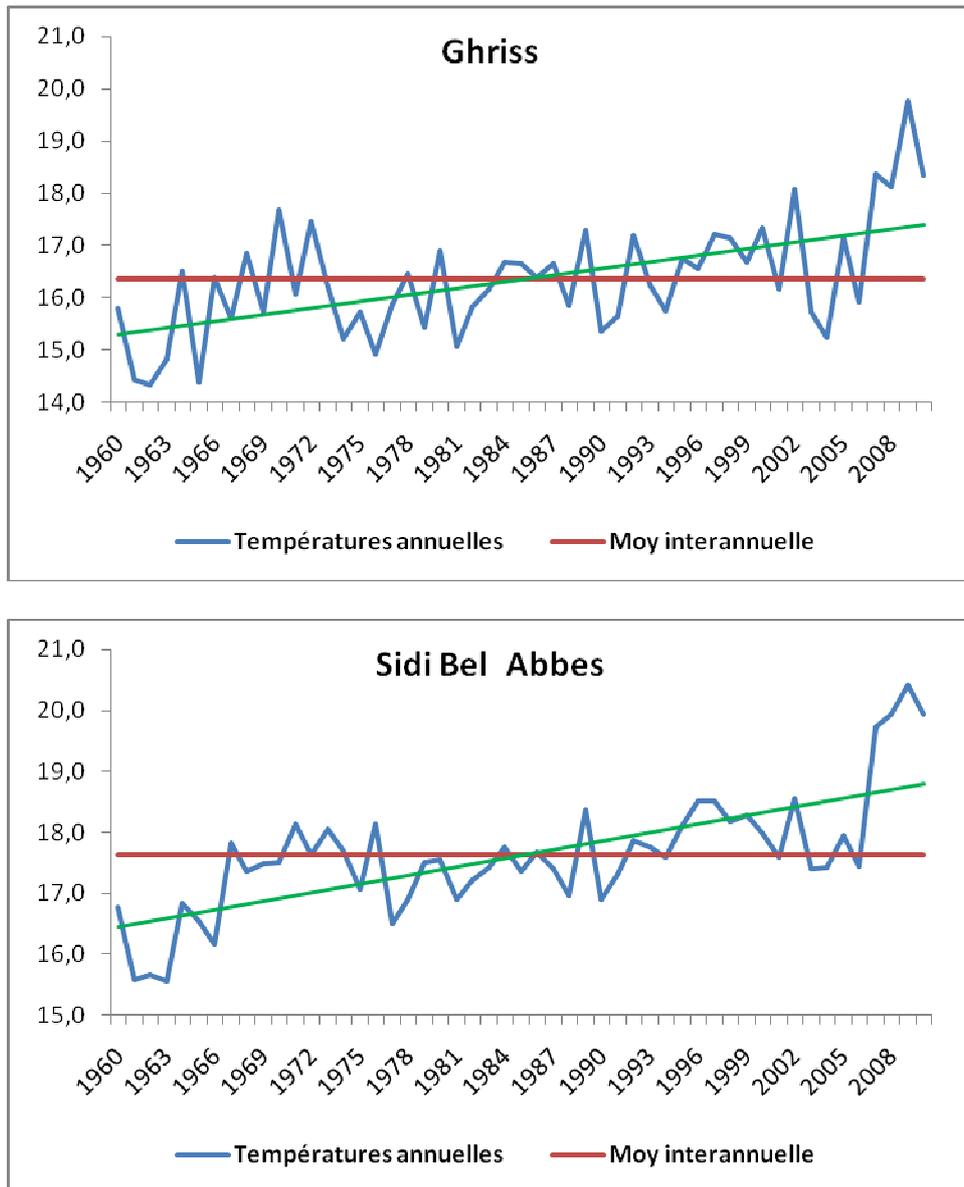


Figure 12: Tendances des températures annuelles par régression linéaire

a) Analyse de tendance des températures par la régression linéaire :

Dans l'ensemble, L'analyse graphique de l'évolution annuelle des températures durant la période d'étude (1960-2010) (figure 12), met en évidence deux phases par rapport à la moyenne interannuelle :

La première phase : du 1960 au début de l'année 1991 apparait comme une période de refroidissement où les températures annuelles sont au-dessous de la moyenne interannuelle pour toutes les plaines.

La deuxième phase : entre 1992 et 2010, est une période caractérisée par un réchauffement pour toutes les plaines, sauf la plaine de Ghriss où elle a vu une courte période baisse entre (2003-2006).

Dans toutes les plaines, les températures annuelles atteignent leur maximum durant la période (2009-2010).

La tendance des températures par la régression linéaire est en augmentation à partir de l'année 1986 pour toutes les plaines sauf la plaine du Bas Cheliff où la tendance des températures a augmenté à partir de l'année 1980.

4) Analyse de la variabilité temporelle de la pluviométrie:

Nous allons développer dans cette section la variabilité pluviométrique au pas de temps annuel, saisonnier et mensuel pour avoir une idée sur les variations du régime pluviométrique au niveau de seps plaines du Nord Ouest Algérien depuis l'année 1960.

4.1) Analyse de la variabilité de la pluviométrie :

La variabilité à l'échelle interannuelle entraîne des conséquences sur la vie économique et suppose des adaptations particulières dans le cas d'une persistance des anomalies (changement d'activités).

L'alternance des années sèches et des années humides est une caractéristique du régime pluviométrique de la région ; mais ce qui pose problème, c'est la succession d'années sèches.

Nous allons examiner le degré de variabilité pluviométrique aux échelles interannuelle et inter mensuelle.

4.1.1) Variabilité inter-annuelle des pluies :

L'une des caractéristiques principales de la pluviométrie, dans notre région d'étude, est sa grande variabilité inter- annuelle. En effet, d'une année à l'autre le total annuel peut varier fortement.

4.1.1.a) Caractéristiques statistiques des pluies annuelles :

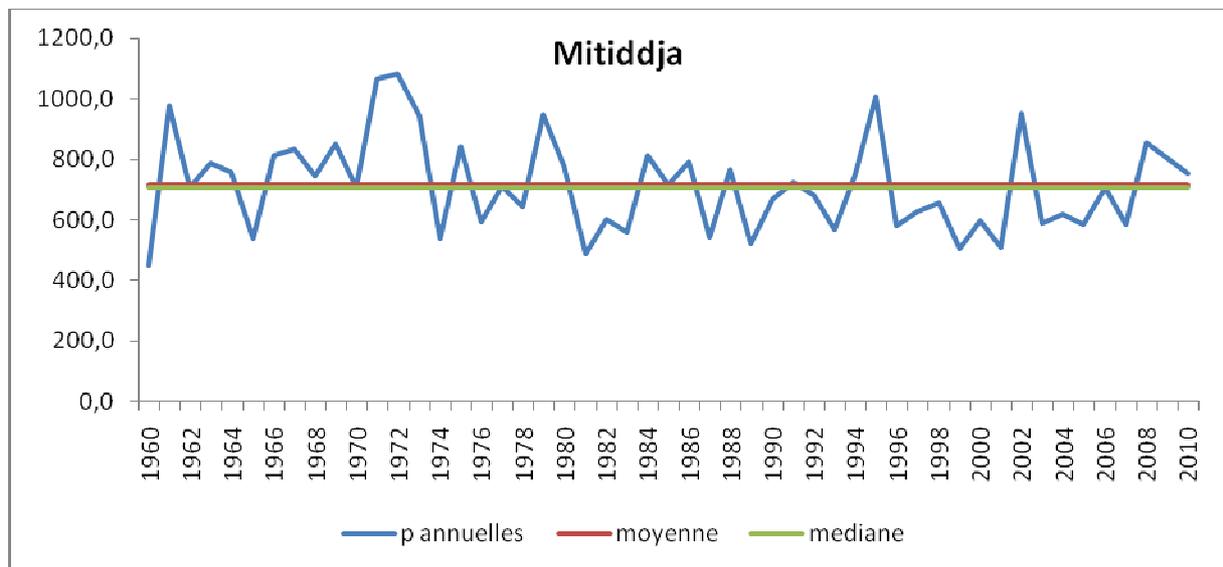
Pour caractériser la variabilité interannuelle dans la région d'étude, les différentes caractéristiques statistiques des pluies au niveau de seps plaines durant la période (1960-2010) (Tableau 15) ont été définies. Pour évaluer cette variabilité, des formules climatiques simples ont été employées mais, capables de donner de bonnes informations permettant aussi une

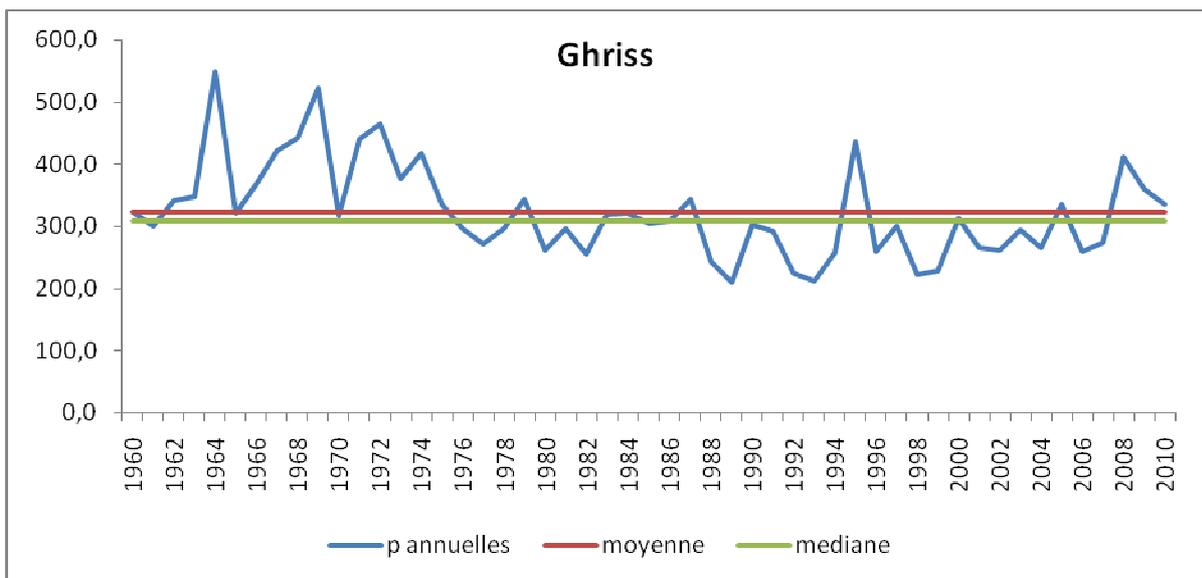
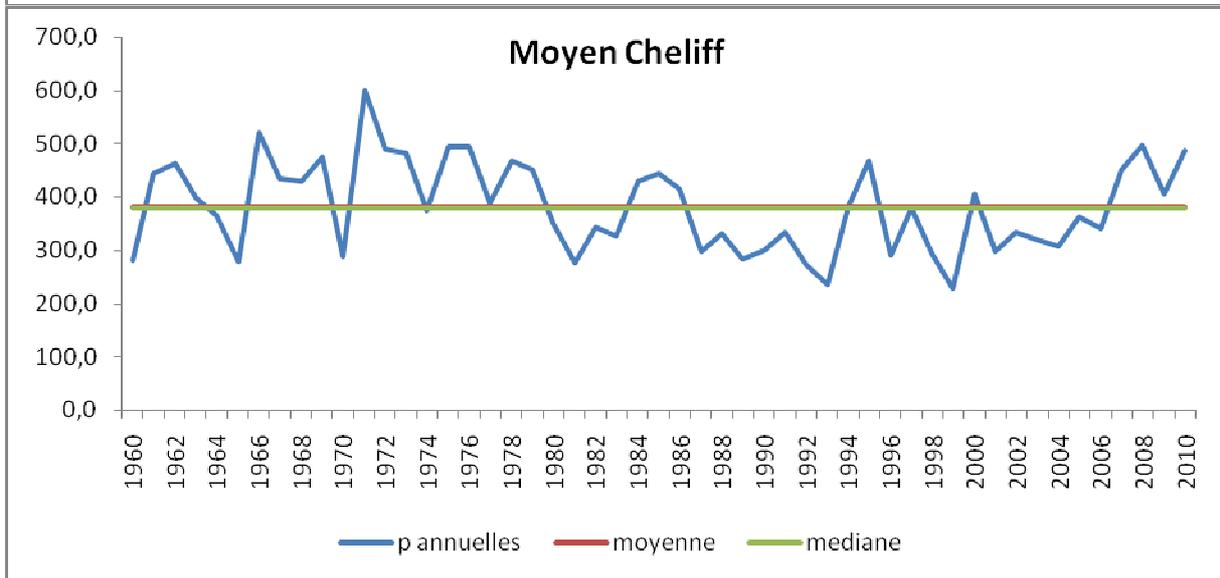
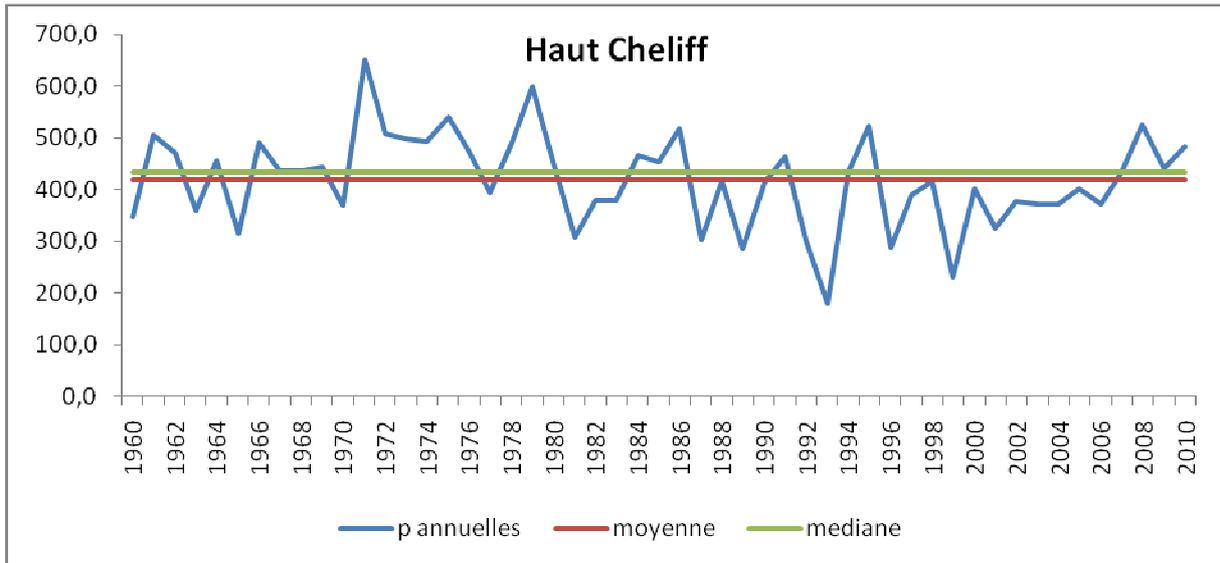
représentation efficace du phénomène. La moyenne annuelle des totaux précipités varie entre 713.9 mm et 292.4 mm au niveau de la plaine de Mitidja et Maghnia respectivement qui constitue les deux extrêmes de la région d'étude.

Tableau 15: Caractéristiques descriptives des séries d'observation à l'échelle annuelle:

<i>Plaine</i>	<i>moyenne</i>	<i>Ecart type</i>	<i>Médian</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>	<i>Max/min</i>	<i>coefficient de variation %</i>
Mitidja	713,9	156,1	706,2	1082,30	448,70	2,41	22
High Cheliff	419	89,9	432,5	651,60	178,50	3,65	21
Middle Cheliff	382,3	85,7	379,9	600,50	227,50	2,64	22
Low Cheliff	348,9	70,2	343,2	483,30	208,50	2,32	20,1
Ghriss	322,9	76	308,8	548,60	210,10	2,61	23,5
Sidi Bel Abbes	344,6	84,6	360,1	561,70	195,00	2,88	24,5
Maghnia	298,4	82,7	287,8	501,30	173,70	2,89	27,7

On a remarqué également que les moyennes des précipitations dans les 7 plaines sont assez proches de la médiane, ceci montre qu'effectivement la loi de distribution est légèrement dissymétrique.





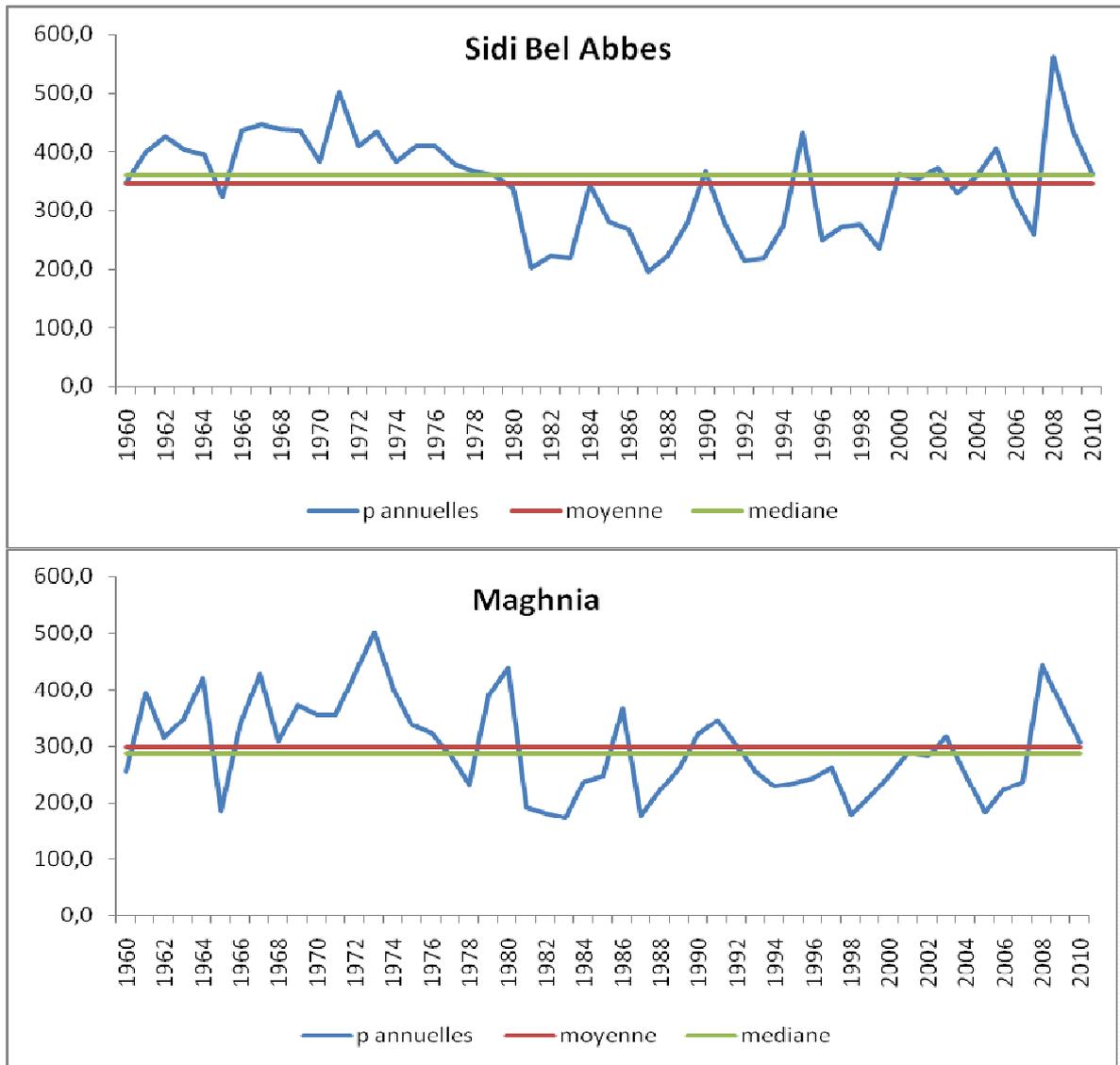


Figure 13: Evolution chronologique de la pluviométrie annuelle dans les seps plaines durant la période (c)

L'étude de la variabilité interannuelle durant la période 1960-2010 (Figure 13), montre que le plus grand nombre d'années déficitaires a été observé durant les décennies 80, 90 et 2000 pour toutes les plaines. Ces résultats montrent également la discontinuité des totaux déficitaires sur la période étudiée. Entre ces grandes sécheresses, la pluviométrie a été généralement normale ou excédentaire, pour la majorité des plaines on observe une sécession des années pluvieuse et sèches durant la période 1960-1980. L'année hydrologique la plus sèche depuis 1960 a été observée en (1982-1983), où le total pluviométrique annuel a atteint 173.7 mm dans la plaine de Maghnia.

4.1.2) Etude de la variabilité intra-annuelle :

Dans cette partie on va étudier la variabilité mensuelle et saisonnière des précipitations. En effet, on va savoir si la diminution de la pluviométrie mise en évidence précédemment est due à une saison donnée, ou si elle a touché l'ensemble des mois. Le déficit hydrique sur le plan agronomique, n'aura pas les mêmes conséquences, selon qu'il intervient au début de la campagne ou pendant les différentes phases du cycle (**Khaldi A., 2005**).

4.1.2.a) Les précipitations mensuelles:

Pour étudier les changements dans le régime pluviométrique des dernières décennies et la baisse de la pluviométrie d'un mois spécifique, nous allons choisir deux périodes de vingt ans successives à savoir 1980 à 1990 et 1990 à 2000 pour faire une comparaison entre les précipitations mensuelle. Le choix de ces deux périodes a été fait selon les données disponibles ainsi que pour le déficit pluviométrique qui a été observé précédemment à partir de 1980 pour la majorité des plaines.

La comparaison entre les précipitations mensuelle a été faite à l'aide de deux paramètres statistiques, la moyenne et la médiane. Ces deux paramètres de tendance centrale ne sont pas statistiquement différents dans le cas de distributions symétriques. Mais il y a des études qui ont été faite dans ce sens montrent que les distributions mensuelles sont dissymétriques (**Bouacheria, 2000**).

Les figures 14 montrent l'évolution intra-annuelle des précipitations pour les sept plaines étudiées, l'analyse mensuelle des précipitations montre que l'ampleur de la variation de ces dernières est très nette entre les deux périodes précitées pour toutes les plaines et une mauvaise concordance sur ces deux périodes.

Pour la plaine de la Mitidja, les mois d'Octobre et de novembre, aussi bien sur les moyennes que sur les médianes sont devenues moins pluvieux sur la première période. Par contre, le mois de janvier est plus pluvieux sur la deuxième période, le mois de Décembre sont devenus plus pluvieux pour la seconde période. Pour le reste des mois et à partir du mois d'Avril jusqu'à Aout on remarque une bonne concordance sur les deux périodes.

Les plaines de Haut et Moyen Cheliff représente le même comportement que la plaine de la Mitidja, sauf qui il y a une mauvaise concordance entre les mois sur les deux périodes.

En ce concerne la plaine de Sidi Bel Abbes, le mois de Janvier est le mois le plus pluvieux pour les deux périodes.

Pour la plaine de Ghriss, Février est le mois le plus pluvieux pour les deux périodes.

Pour la plaine de Maghnia, les mois les plus pluvieux ont été observés dans la deuxième période.

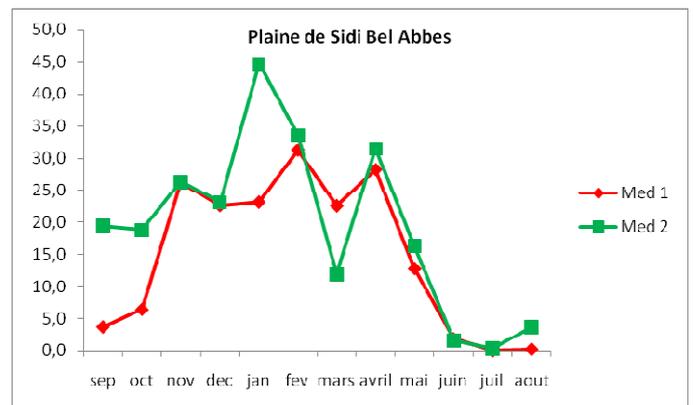
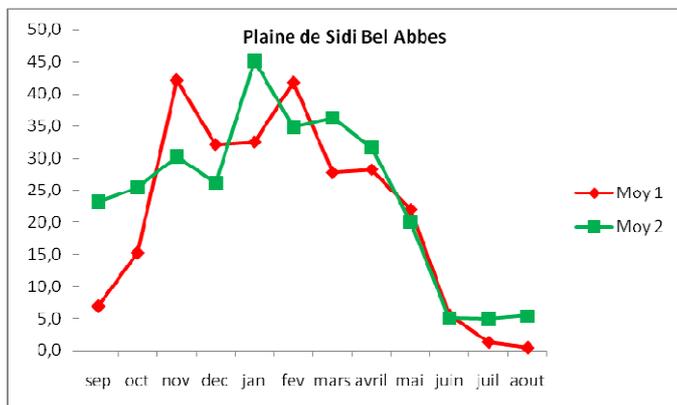
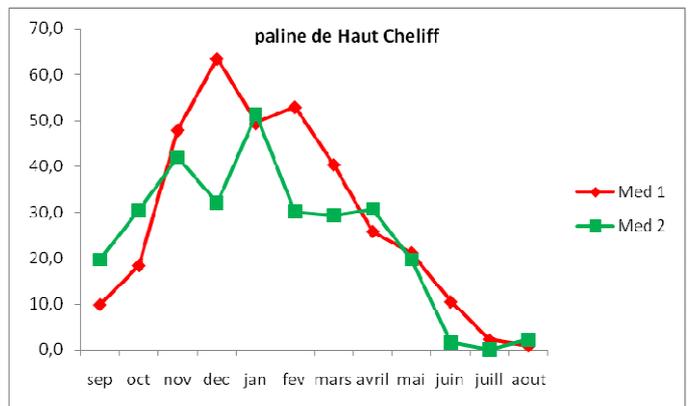
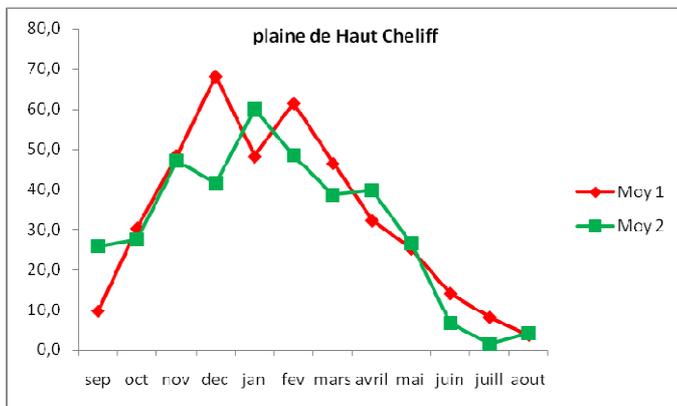
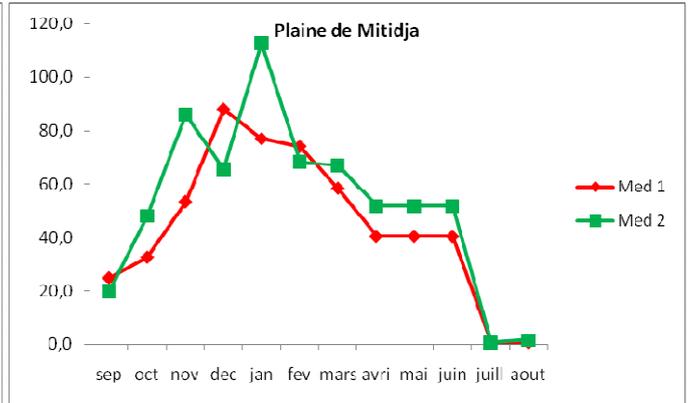
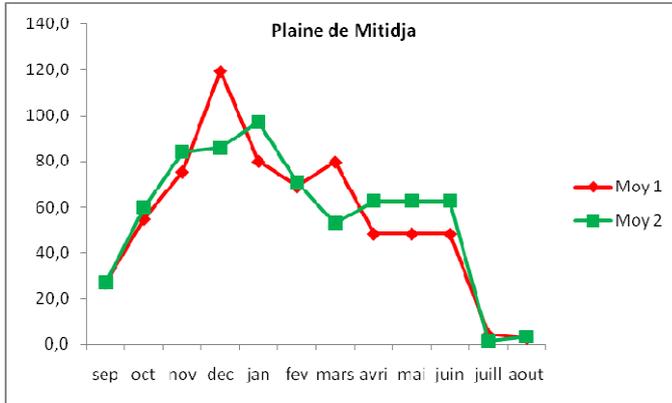




Figure 14 : évolution intra-annuelle de la pluviométrie pour les sept plaines

4.1.3) La variabilité saisonnière :

Pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons, la variabilité saisonnière des précipitations pour les sept plaines a été étudiée. Cette étude s'est bornée aux trois saisons (automne, hiver et printemps).

Le tableau 16 donne les moyennes d'automne, l'hiver et de printemps en considérant les deux périodes (1980-1989) et (1990-2000). La moyenne pour la deuxième période est généralement inférieure par rapport à la première pour la saison d'hivers pour les sept plaines, elle est faible sur la saison d'automne pour la première période pour toute les plaines sauf la plaine de Maghnia et pour la saison de printemps, la moyenne varie d'une plaine à l'autre.

Tableau 16 : Analyses des moyennes d'Automne, hivers et de printemps sur les deux périodes (1980-1989) et (1990-2000).

	<i>automne</i>		<i>hiver</i>		<i>printemps</i>	
	Moy 1	Moy 2	Moy 1	Moy 2	Moy 1	Moy 2
Mitidja	156,7	170,5	268,1	253,6	176,4	178,2
Haut Cheliff	88,4	100,2	177,9	145,8	104,0	105,2
Moyen Cheliff	82,8	94,7	153,9	124,6	98,0	96,9
Sidi Bel Abbes	64,4	73,3	106,5	98,1	78,0	67,0
Ghriss	79,2	80,0	114,1	93,7	80,8	89,9
Maghnia	59,0	51,7	96,2	68,2	83,4	44,0

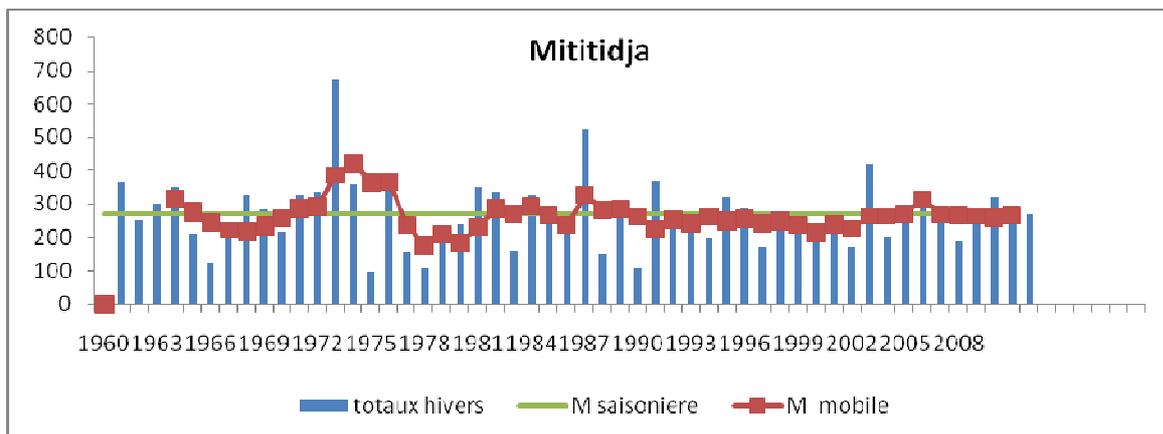
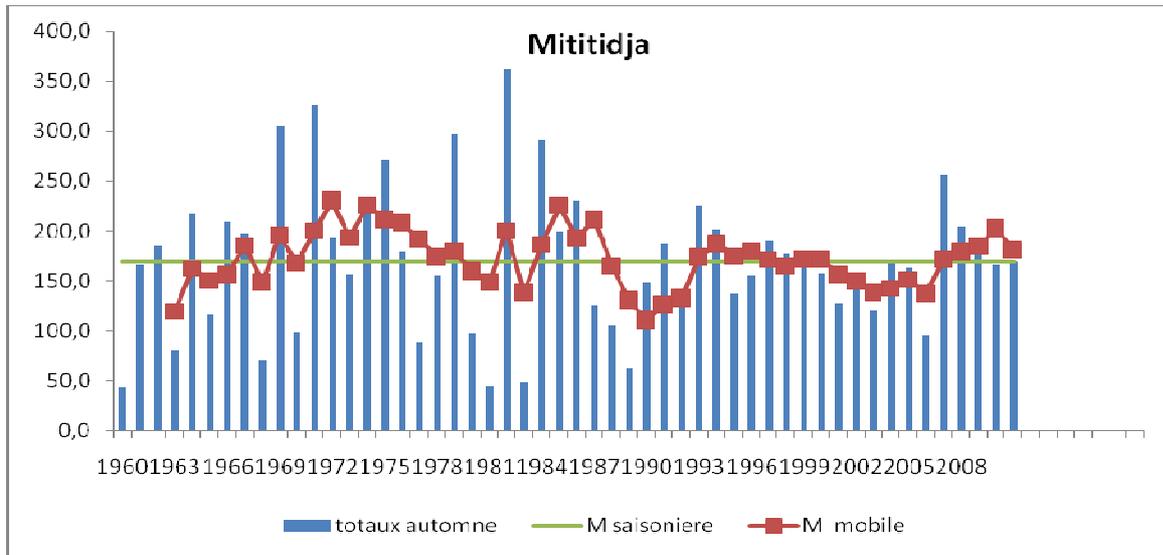
-La moyenne mobile :

Chaque observation est remplacée par une moyenne arithmétique calculée sur la valeur de cette observation et les valeurs voisines qui l'encadrent (**khaldi 2005**); dans notre étude nous avons utilisé trois valeurs : ainsi x_i est remplacé dans la série par $x_{i-1}+x_i+x_{i+1}/3$ On a opté pour cette méthode en raison de sa simplicité.

Les figures 15, 16, 17, 18, 19 et 20 traduisent l'évolution des totaux saisonniers et la moyenne mobile pour les sept plaines. Elles montrent pour la plaine de la Mitidja, le total d'automne est plus élevé en 1982 et il devient plus faible dans l'année suivante (1983), le totaux pluviométrique d'hivers est apparait plus faible en l'année 1974, En ce concerne les totaux du printemps ont connu une nette baisse dès le début de l'année 1960, ceci apparaît très nettement pour la saison d'hiver et du printemps que en Automne.

Les plaines de Haut, Moyen Cheliff, Ghriss, Sidi bel Abbes et de Maghnia ont connu aussi des variations très nettes, de sorte qu'on observe une grande tendance à la baisse de pluie pour les trois saisons et durant les décennies 80 et 90.

Donc, on peut dire que la tendance à la baisse de la pluviométrie dès les années quatre-vingt et quatre-vingt dix est principalement provoquée par une baisse des pluies du printemps et particulièrement d'hiver.



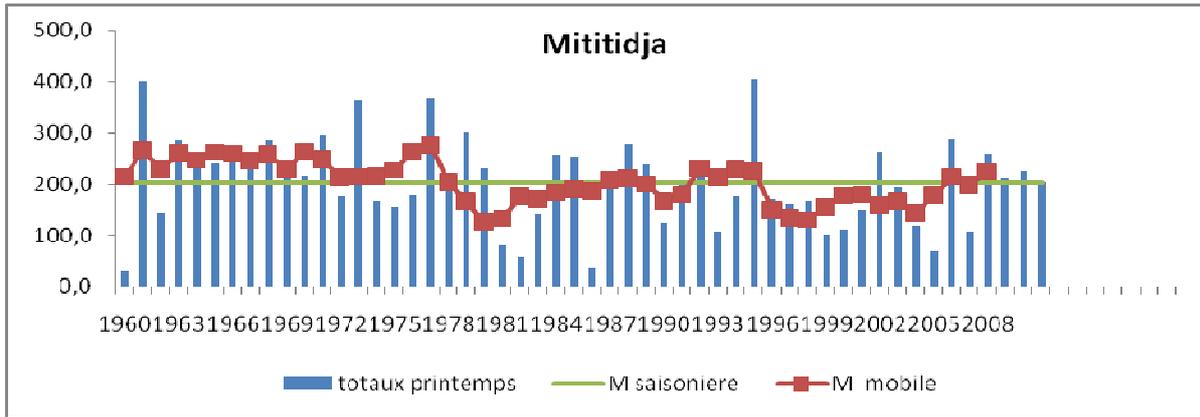
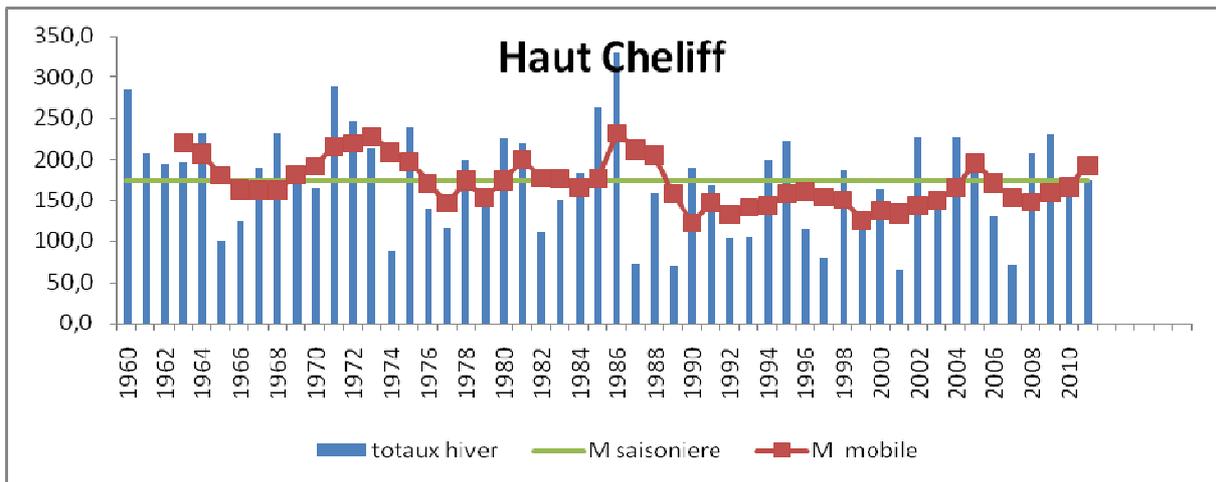
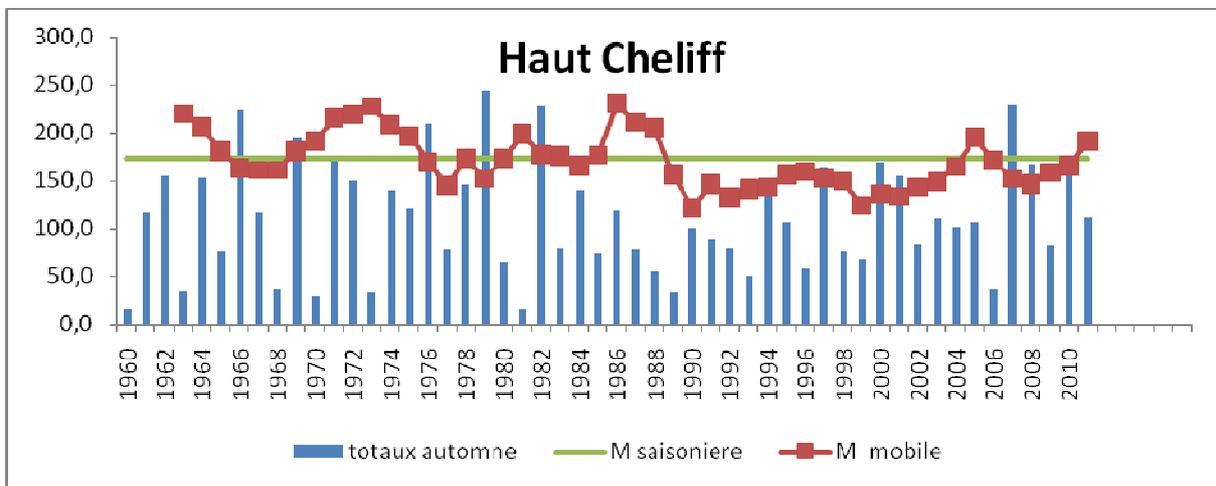


Figure 15 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Mitidja.



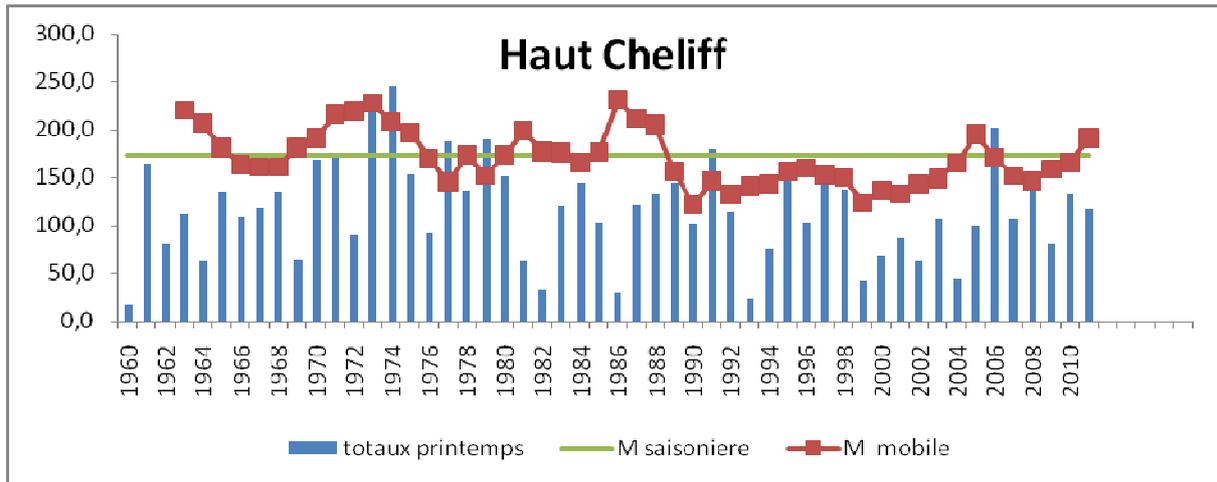
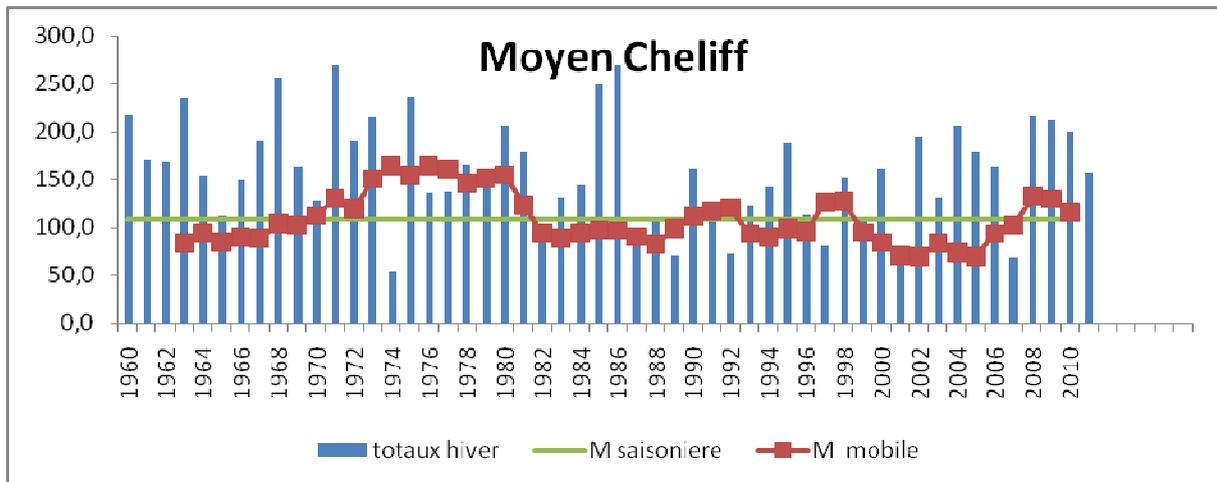
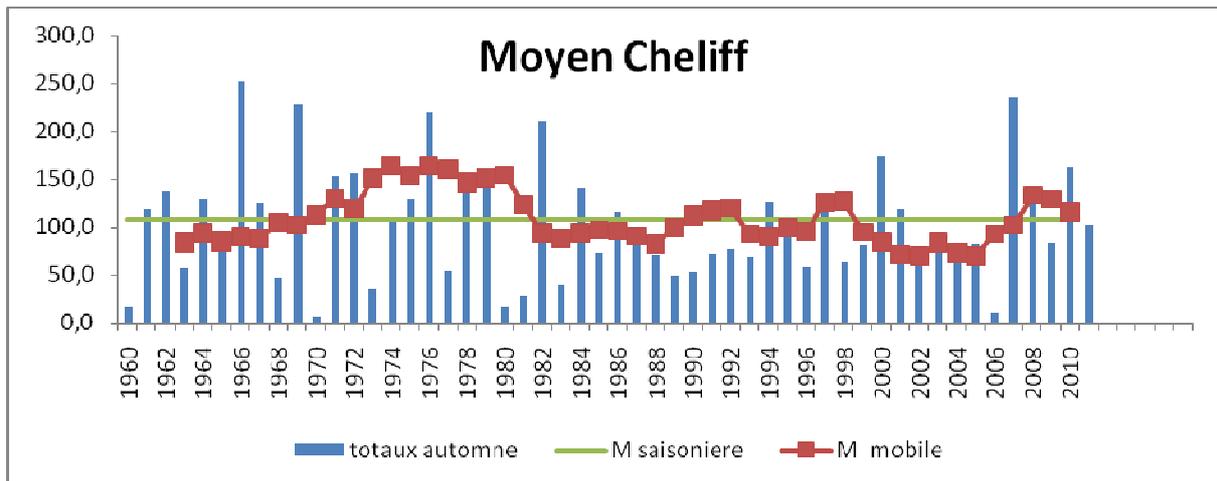


Figure 16 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Haut Cheliff.



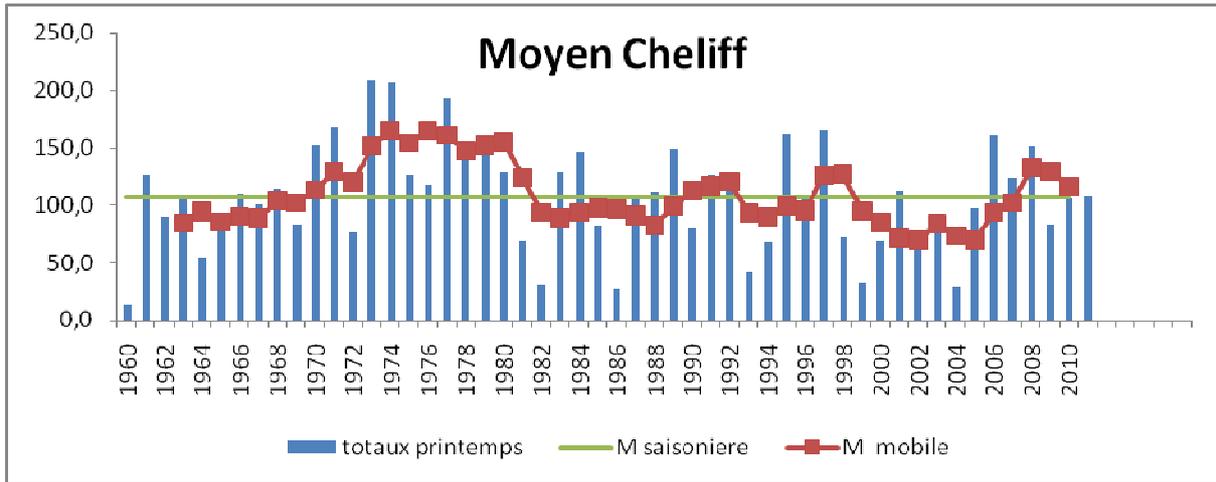
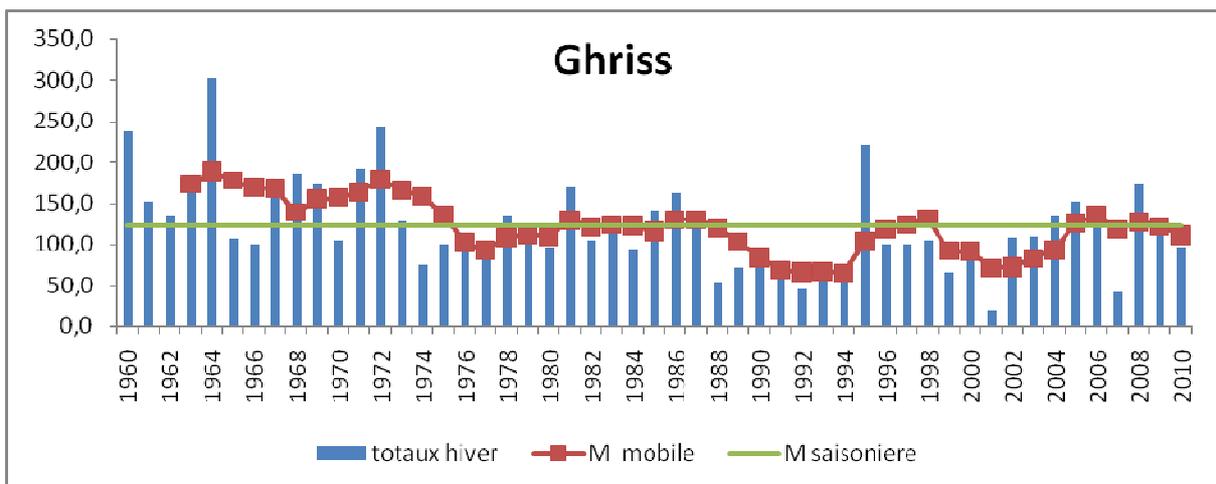
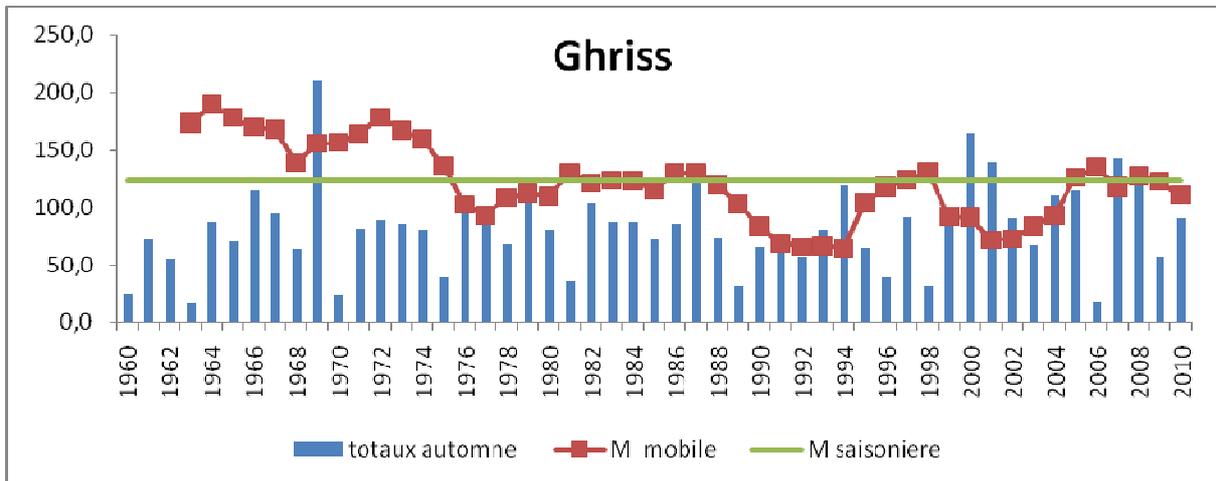


Figure 17 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Moyen Cheliff.



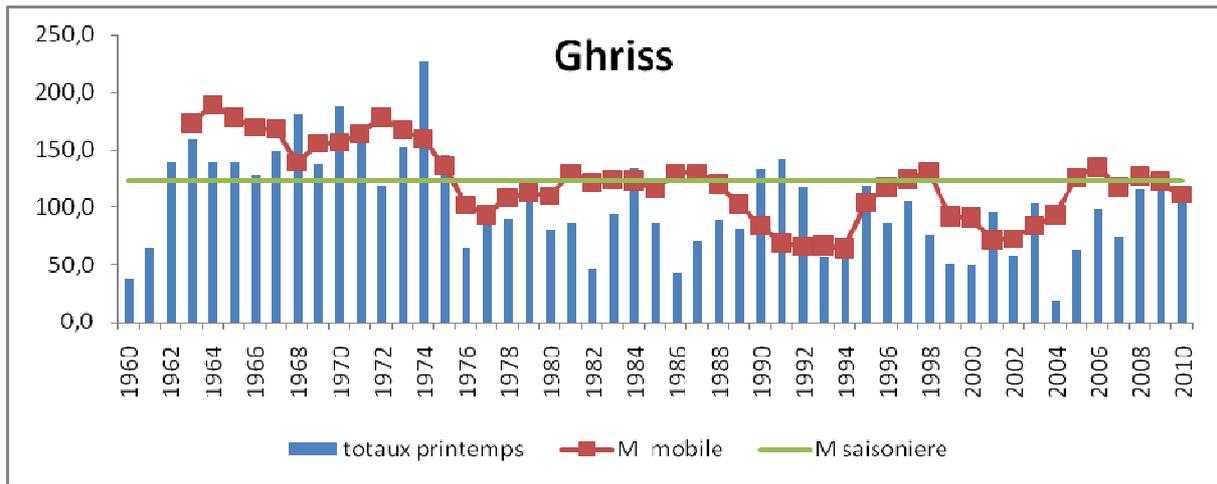
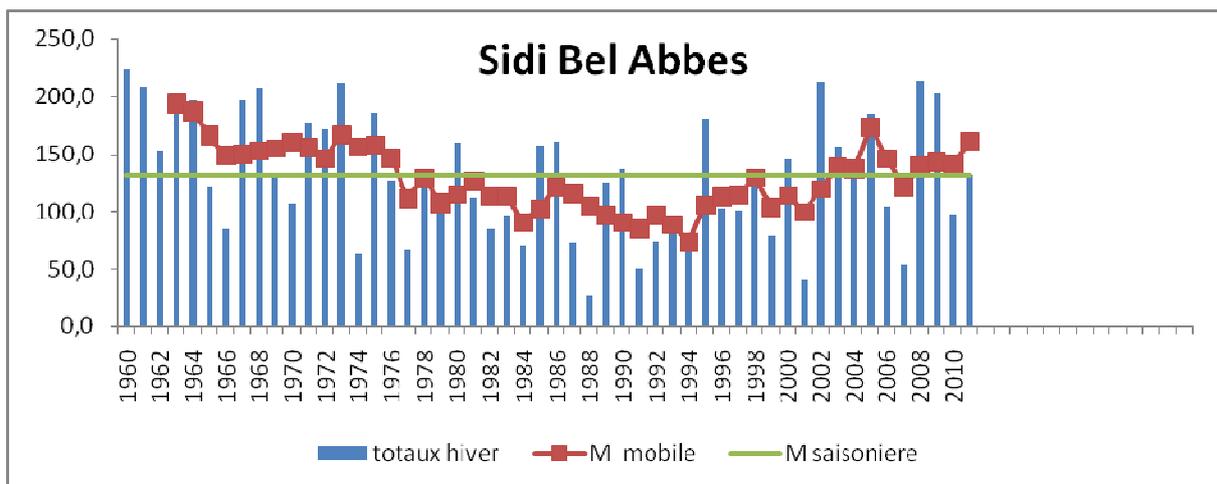
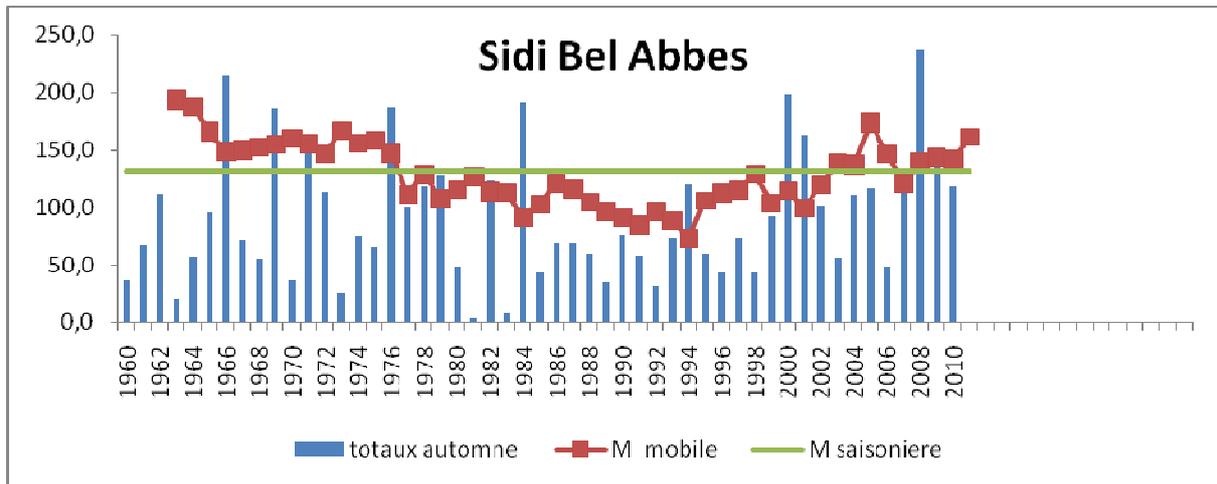


Figure 18 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Ghriss.



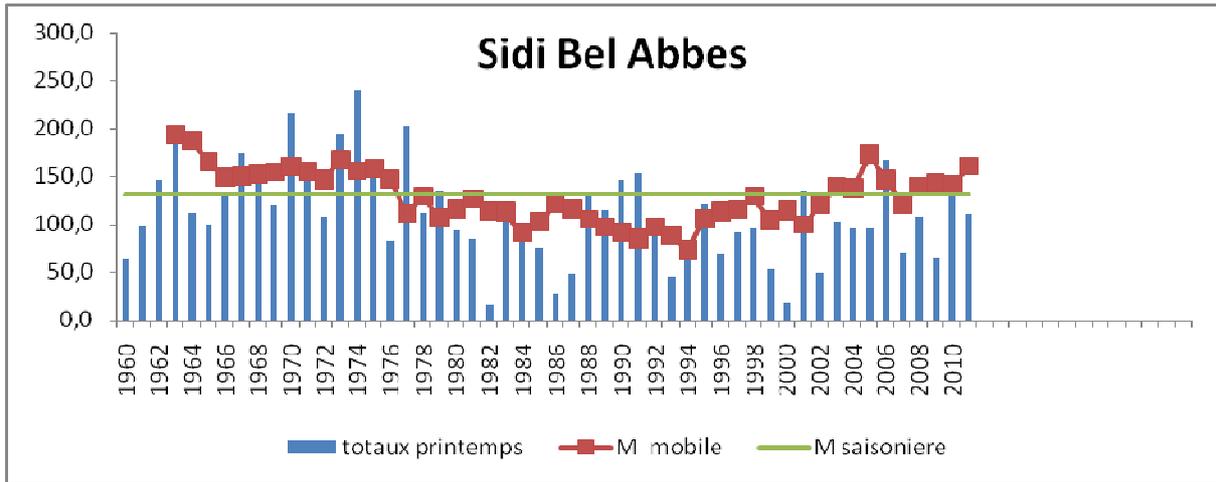
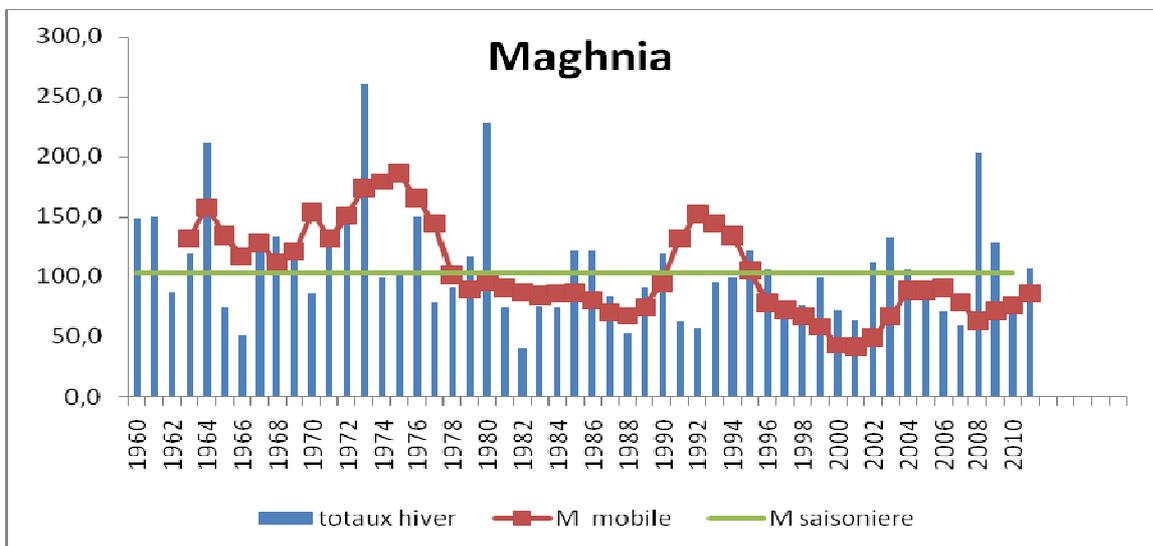
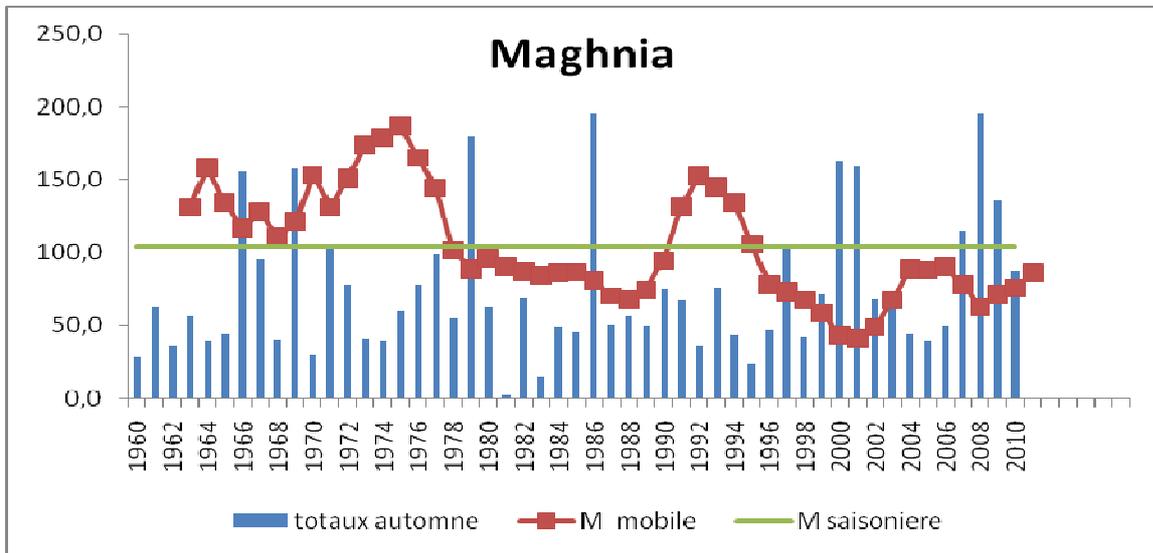


Figure 19 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Sidi Bel Abbès.



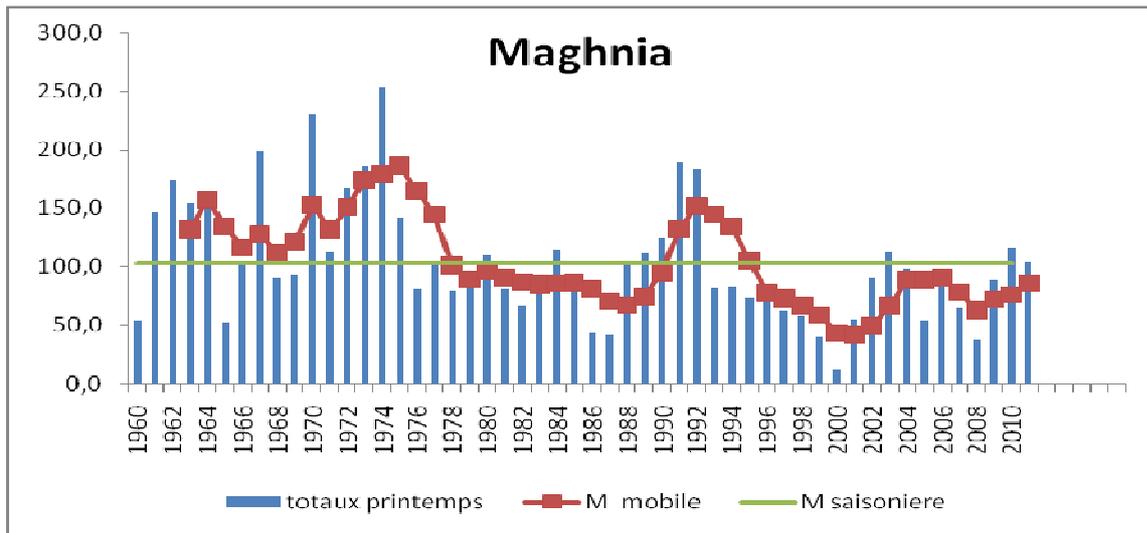


Figure 20 : Evolution des totaux pluviométriques avec leur moyenne Mobile dans la plaine de Maghnia.

5) Conclusion :

Cette étude a permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité climatique dans les sept plaines du Nord-Ouest de l'Algérie. Les températures les plus élevées ont été observées dans les plaines ouest par rapport aux plaines est et centre.

A partir de l'étude de la variabilité interannuelle durant la période 1960-2010, les années déficitaires ont été observées durant les décennies 80, 90 et 2000 pour toutes les plaines.

L'analyse mensuelle des précipitations pour les sept plaines étudiées, montre que l'ampleur de la variation de ces dernières est très nette entre les deux périodes 1980 à 1990 et 1990 à 2000 pour toutes les plaines et une mauvaise concordance sur ces deux périodes.

Chapitre V

**Caractérisation de la
sécheresse à l'aide des indices
de sécheresse**

1) **Introduction :**

Savoir quel indice de sécheresse serait le mieux adapté à tel ou tel climat et à telle ou telle application est une question qui suscite force et débats au fil des ans. Bon nombre de définitions et d'indices de la sécheresse ont vu le jour et certains auteurs ont essayé à formuler des avis éclairés sur le sujet **OMM (2012)**.

Au fil des ans, les météorologues et les climatologues ont mis au point et utilisé partout dans le monde de nombreux indices de sécheresse, allant des plus simples, notamment le pourcentage de la normale des précipitations ou les centiles de précipitations aux plus complexes, tel est l'indice de sécheresse de Palmer **OMM (2012)**. Aux États-Unis d'Amérique, des spécialistes de la question ont pris conscience du fait qu'un indice devait être simple, facile à calculer et statistiquement adapté et significatif. De plus, la compréhension des différents effets que peuvent avoir des déficits de précipitations sur les eaux souterraines, sur le volume stocké dans les réservoirs, sur l'humidité du sol, sur le manteau neigeux et sur l'écoulement des cours d'eau a conduit les scientifiques américains McKee, Doesken et Kleist à mettre au point, en 1993, l'indice de précipitations normalisé (indice SPI).

2) **Indice de sécheresse standardisé (standardized precipitation index SPI) :**

L'indice SPI (McKee et al., 1993, 1995) est un indice à la fois puissant, souple à l'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Dans notre travail le SPI été calculé par un programme sous logiciel de MATLAB.

2.1) **Variabilité spatial et temporelle du SPI à différentes échelles de temps :**

2.1-a) **Variabilité spatiale du SPI à différentes échelle de temps :**

Dans cette partie d'étude, nous avons appliqué la méthode d'interpolation (IDW) pour représenter la répartition spatiale du SPI dans le Nord –Ouest d'Algérie à différentes échelles de temps. Dans cette cartographie, nous avons pris une année déficitaire qui représente chaque décennie pour le mois d'avril, (tous ce qui est rouge et en jaune indiquent la présence de la sécheresse) (figure 21).

- **SPI- 3 mois :**

Les cartes du SPI- 3 mois, « Avril 1965 » montrent la présence d'un déficit pluviométrique (SPI négatif) dans toutes les plaines du Cheliff et une existence d'un excédent pluviométrique (SPI positif) dans les parties de Ghriss et de Sidi Bel Abbes. La carte d'avril 1993, montre un déficit pluviométrique atteignant presque toutes les parties du Nord-Ouest Algérien par contre, les années 1975 et 1985 ont connus un déficit pluviométrique qui a touché presque toutes les plaines étudiées.

- **SPI- 6 mois :**

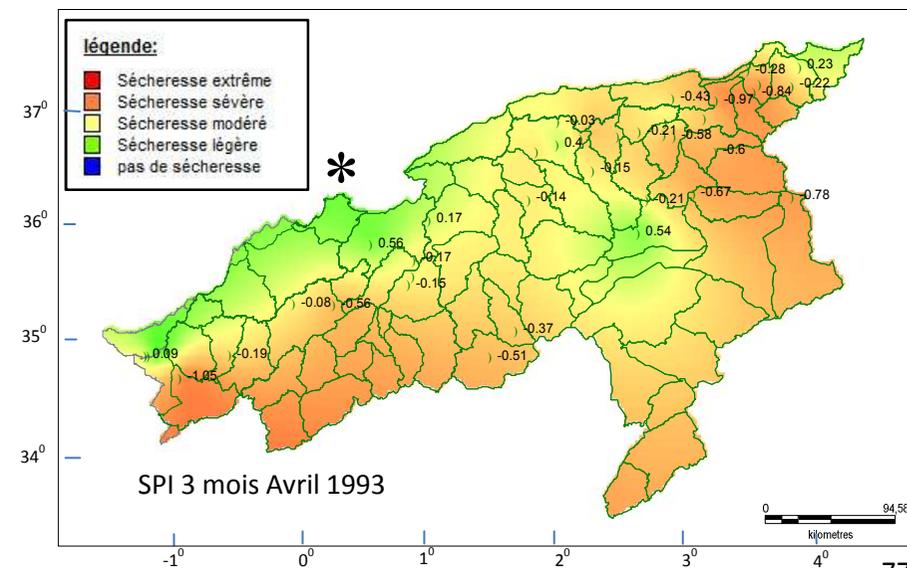
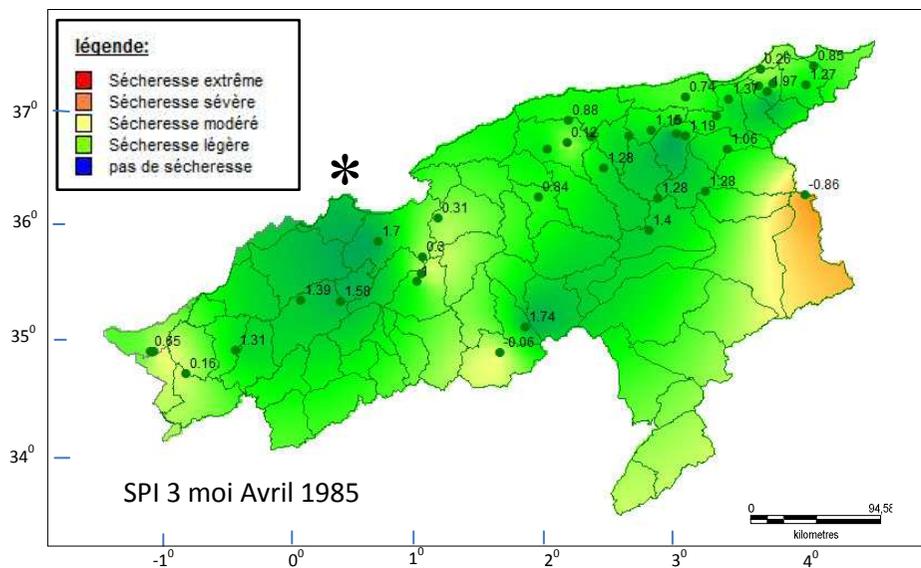
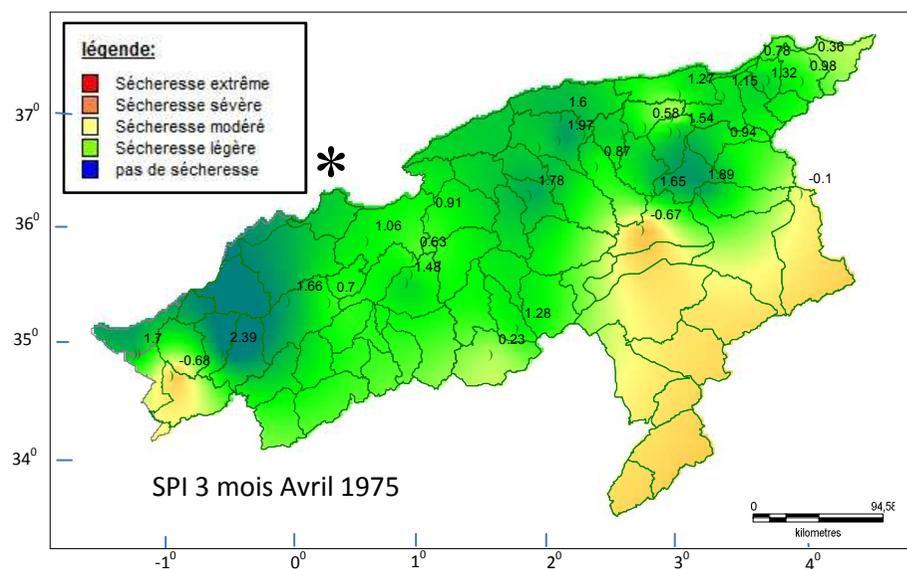
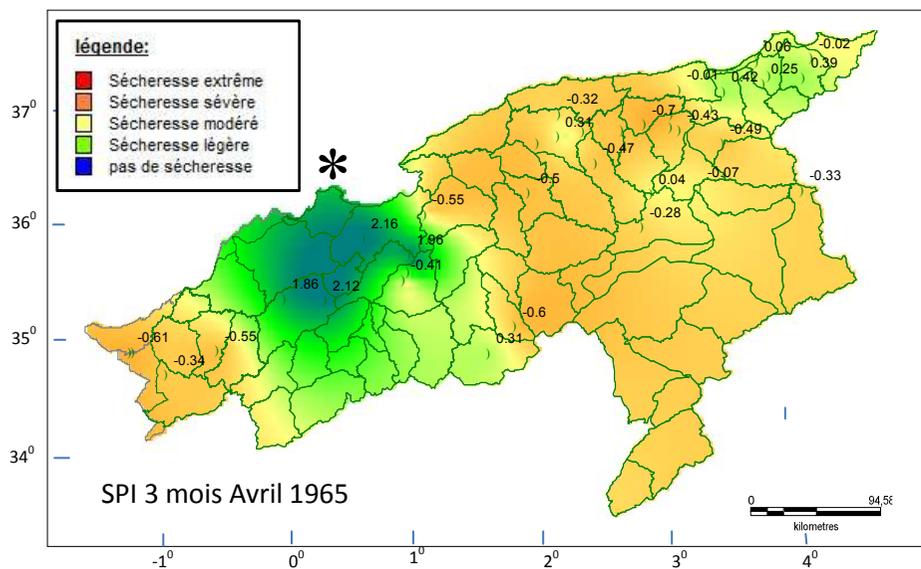
Les carte SPI- 6 mois présentent des SPIs négatifs uniquement durant les deux années,. 1965 pour la plaine de Mitidja, toutes les parties de Cheliff et la plaine de Maghnia et 1993 pour toutes les plaines, par contre, les SPIs positifs sont représentées pour toutes les plaines durant les années 1975 et 1985.

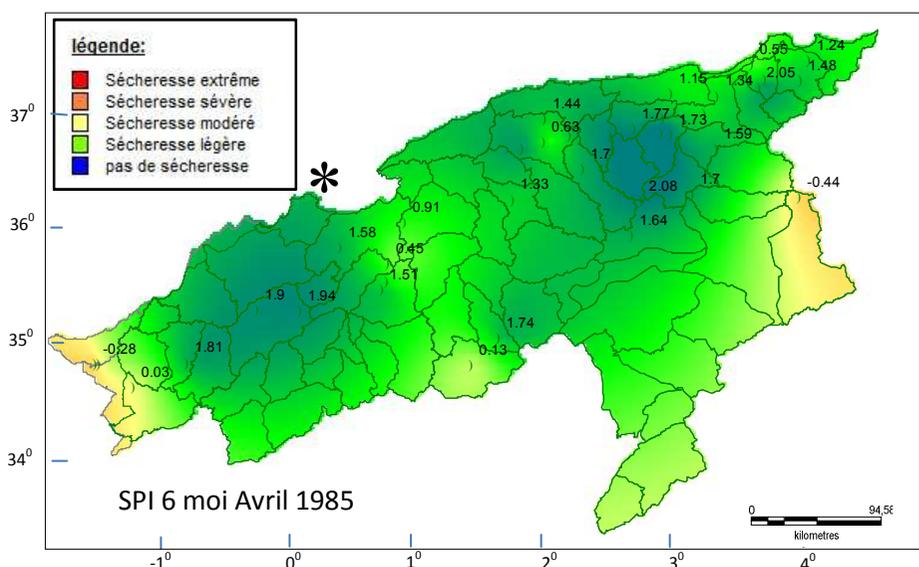
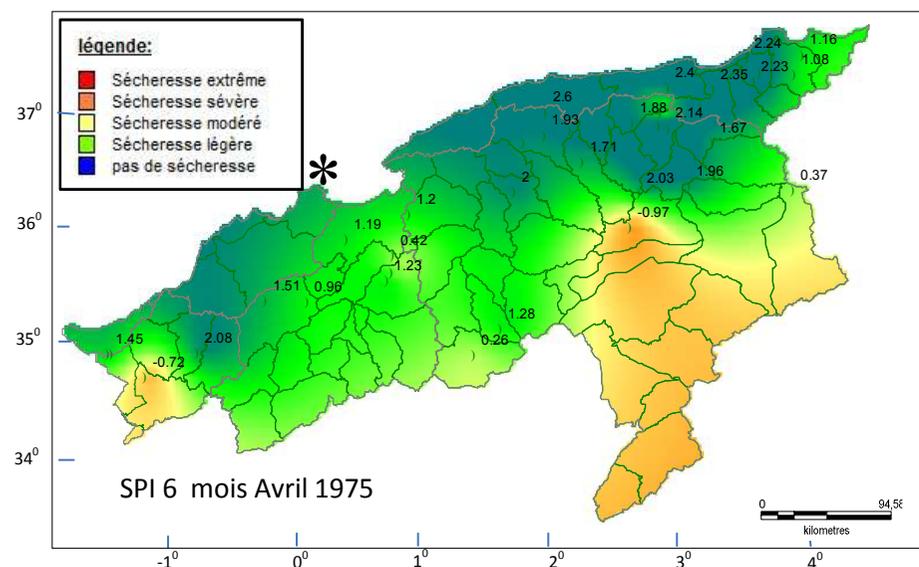
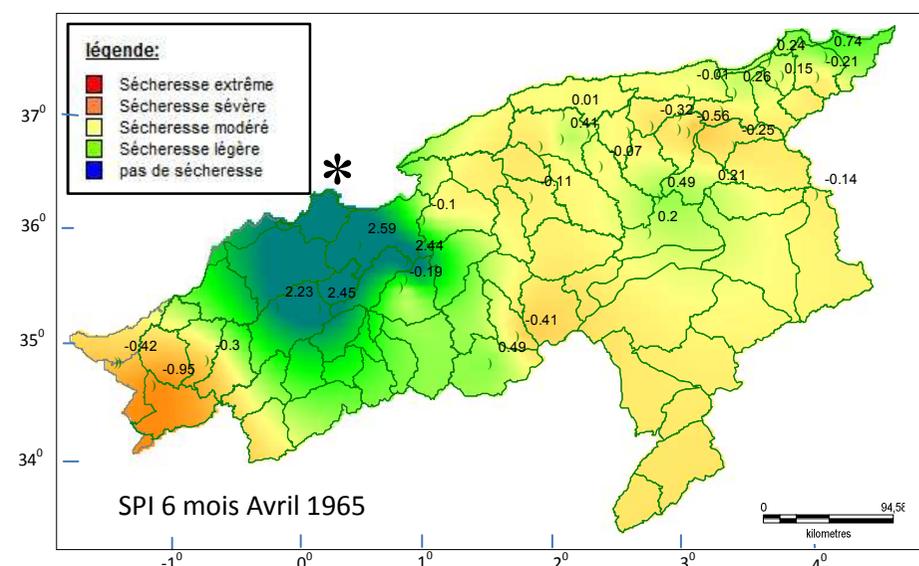
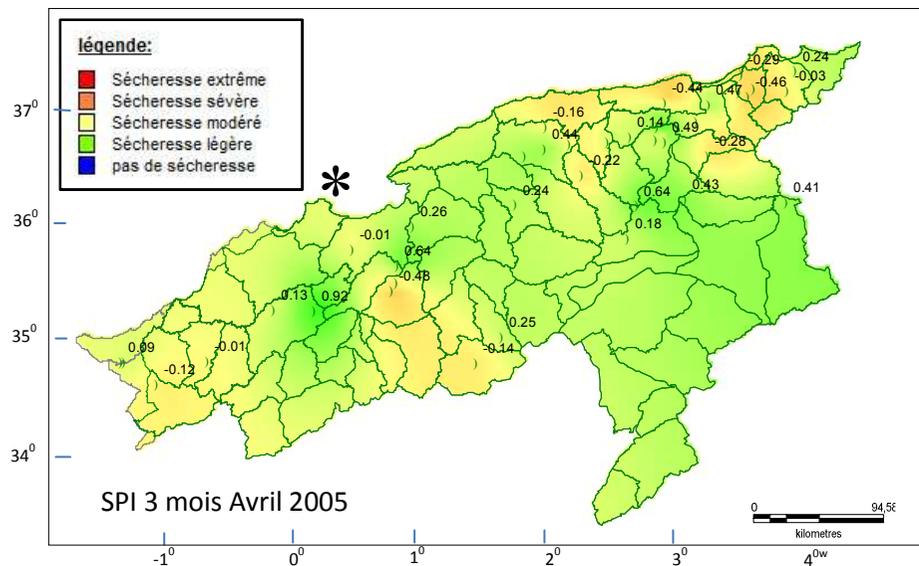
- **SPI- 9 mois :**

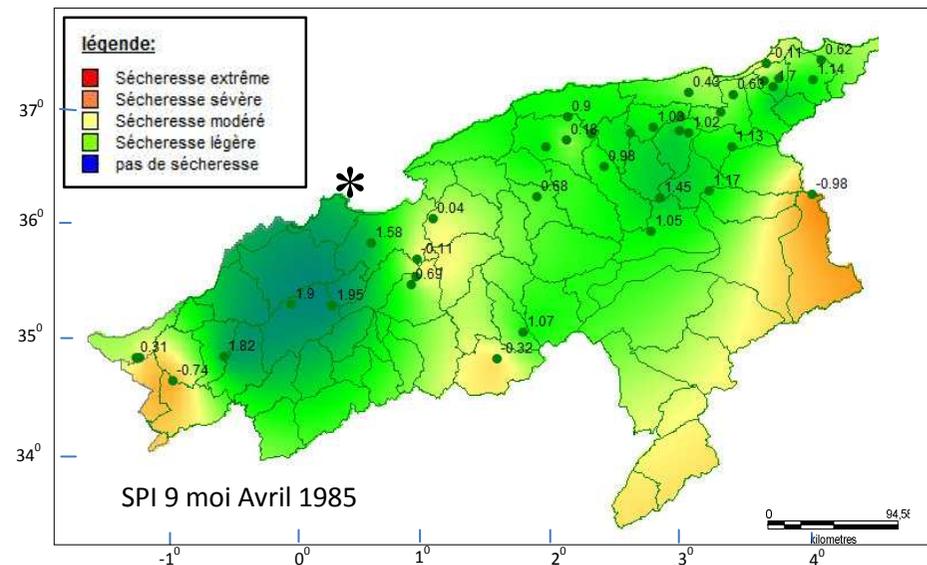
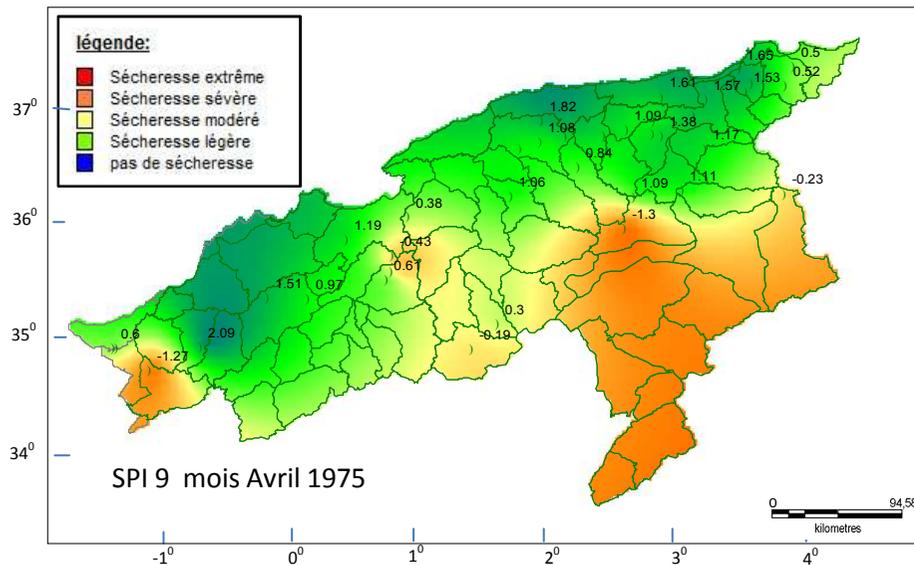
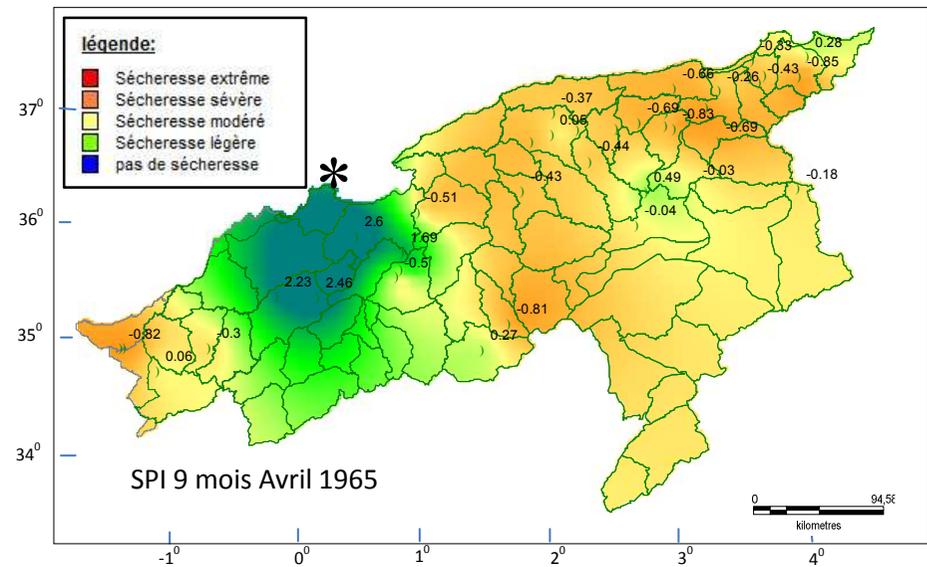
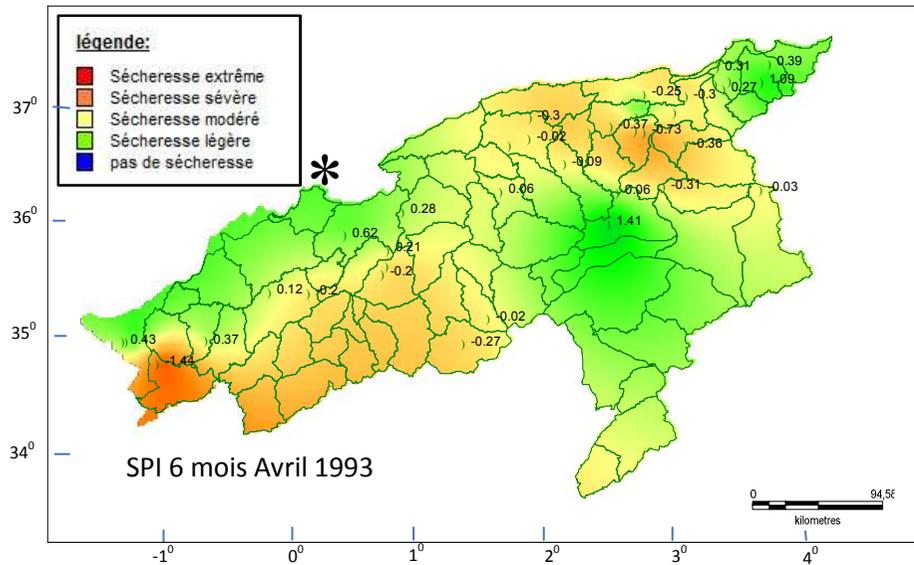
Pour les cartes SPI- 9 mois, le déficit de précipitation (SPIs négatif) était observé dans le Nord des plaines de Cheliff et de Mitidja et dans le sud des plaines de Sidi Bel Abbes et de Ghriss durant l'année 1993. Durant les années 1975, 1958 et 2005, il y a un excédent pluviométrique couvrant tout le Nord des plaines de la région d'étude par contre, il est enregistré uniquement dans le Nord des plaines de Ghriss et de Sidi Bel Abbes durant l'année 1965.

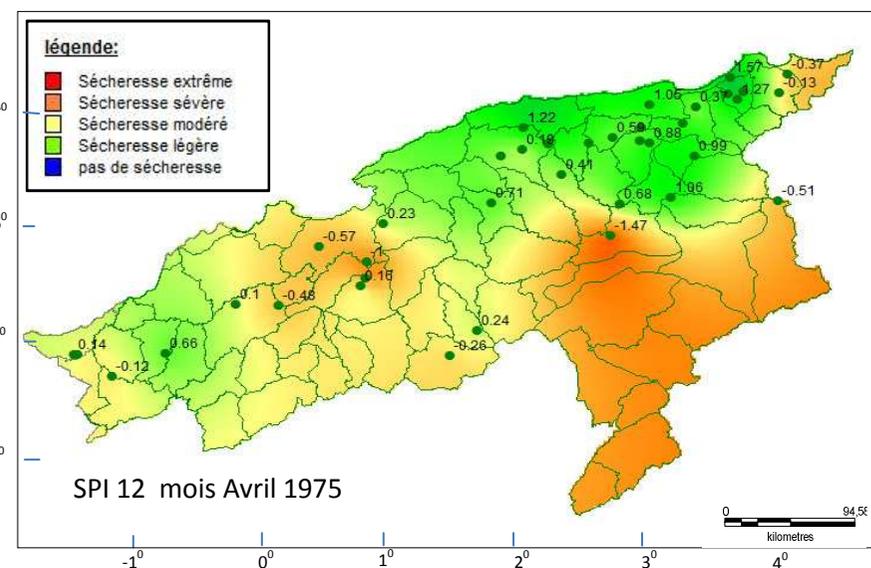
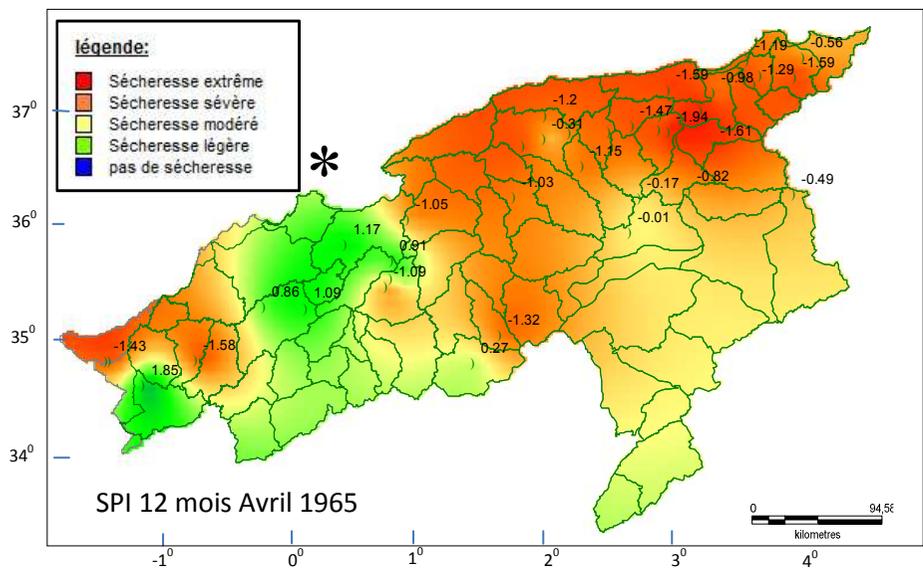
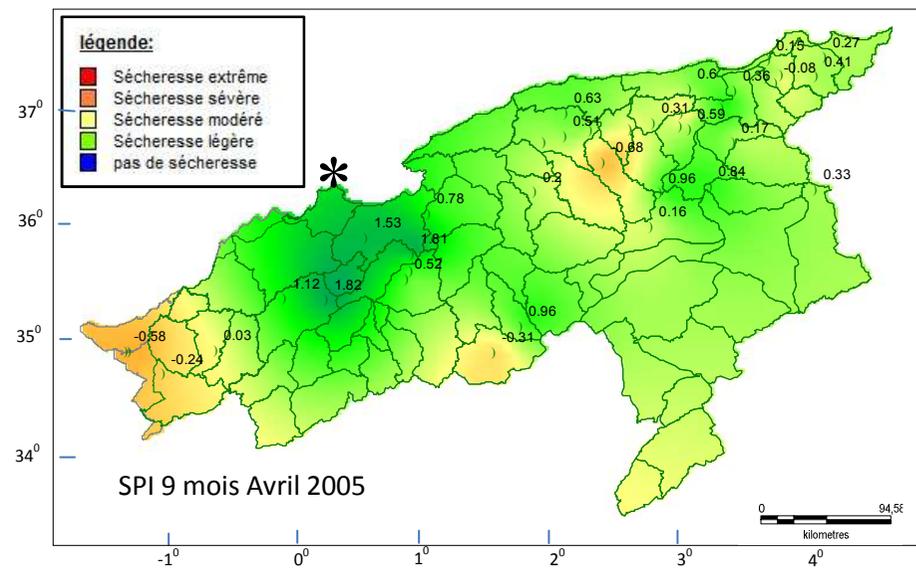
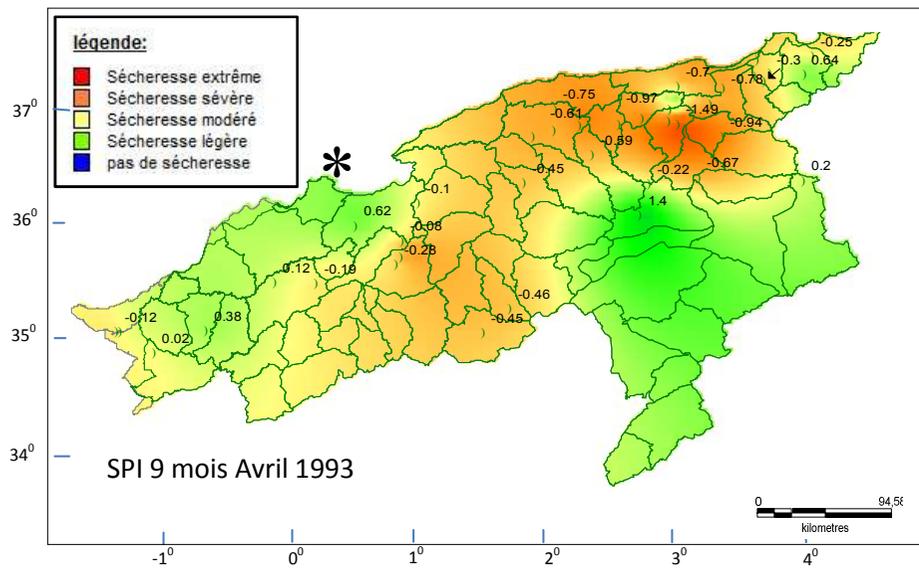
- **SPI- 12 mois :**

Les cartes SPI-12 mois montrent que, pour les années 1993 et 2005, il existe d'un manque de précipitation (SPI négatif) dans toutes les plaines de la région étudiée et en plus dans la plaine de Mitidja et les plaines de Cheliff pour l'année 1965. On remarque qui il y a un changement radicale du régime pluviométrique donc, un changement de l'évolution des SPI entre l'année 1965 et 1975 tel que les parties qui connaissent un déficit de pluies (SPI négatif) durant la première année ont connue un chagement durant la deuxième année et vice versa.









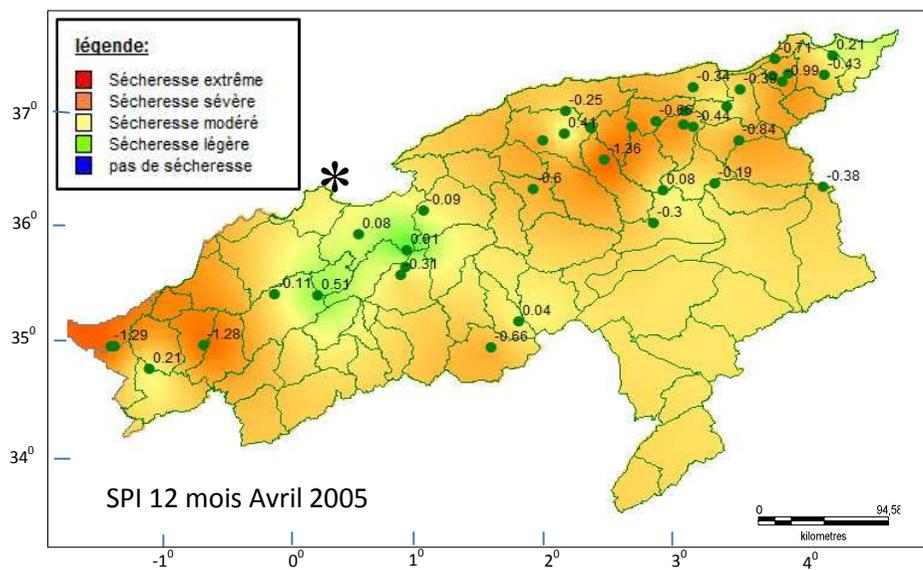
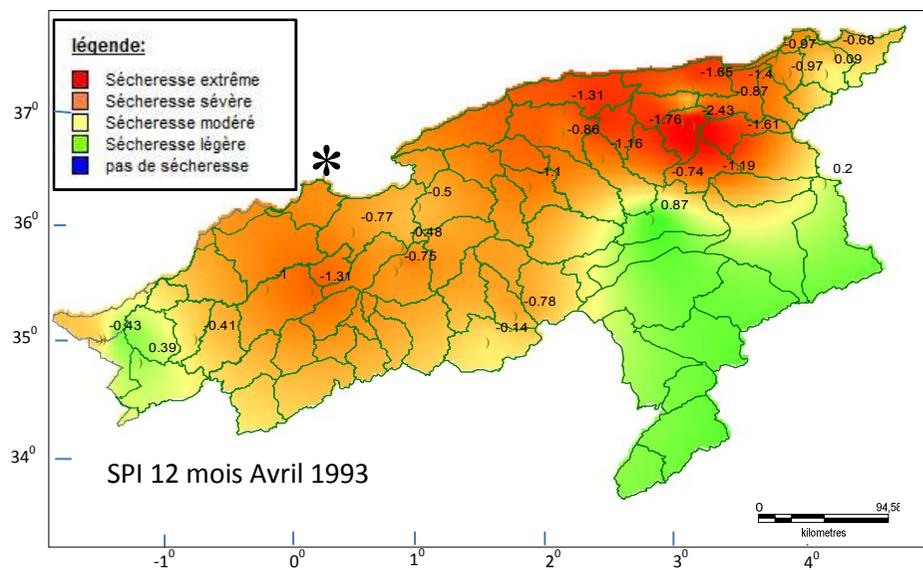
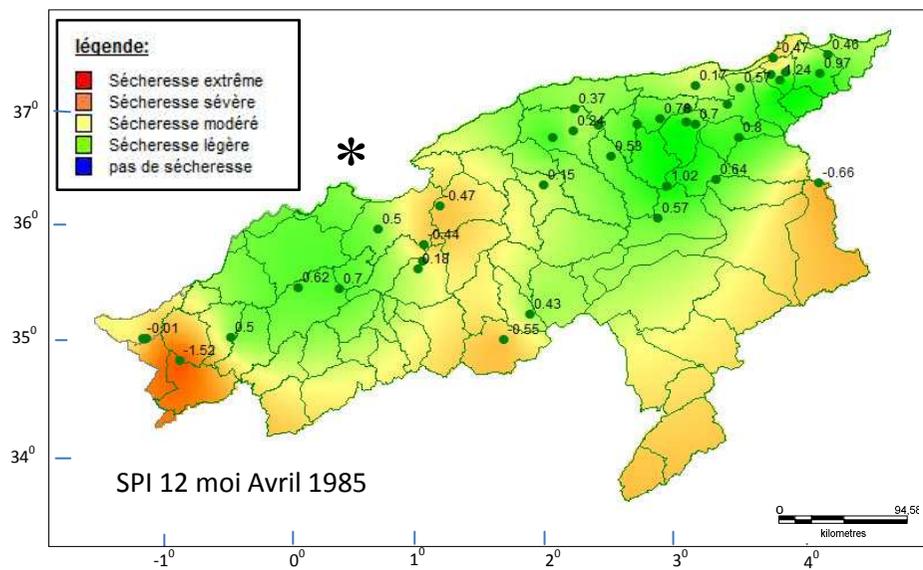


Figure 21 : Cartographie de SPI à différentes échelles de temps pour cinq périodes 65, 75, 85, 93 et 2005

2.1-b) Variabilité temporelle du SPI à différentes échelles

2.1-b-1) comparaison entre les SPIs :

L'analyse de la série de SPI à différentes échelles du temps, indique une situation majoritairement dominée par la sécheresse (SPI négatif) pour les plaines étudiées. L'examen des variations chronologiques des indices SPI permet de constater que le caractère 'sécheresse extrême n'est pas dominant pour l'ensemble des plaines et pour les différentes échelles. D'après la figure 22, en résulte que, pour le SPI-3 mois, les valeurs de SPI varient entre [+4.6 ; -1.5], telles que les valeurs négatives les plus petites sont observées dans les plaines de Bas Cheliff pour la période 1987-1988 et dans la plaine de Ghriss durant la période allant de 2006 à 2007 tandis que la valeur positive maximale de SPIs sont observée dans la plaine de Mitidja durant la période (1974-1975). Quant au SPI-6 mois, les valeurs varient entre [+4.3 ; -2], la valeur minimum du SPI observée dans la plaine du Bas Cheliff durant la période 2005 à 2006, par contre le SPI positif maximum est observé dans la plaine de Ghriss durant la période de (1964,1965).

En ce qui concerne SPI-9 mois, les valeurs du SPI sont comprises entre [+3.7 et -2.6]. La valeur la plus faible a été enregistrée durant la période 1982 à 1983 au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbes où cette année a été caractérisée par des sécheresses sévères au Maroc selon la Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement, alors que la valeur positive la plus forte a été enregistrée dans plaine de Ghriss durant la période (1964,1965). Le SPI-12 mois, les valeurs sont comprises entre [+3.9 et -2.9] et la valeur négative du SPI la plus faible a été observée dans la plaine de Sidi Bel Abbes pour les années 1982,1983. La valeur du SPI positif la plus forte, a été enregistrée dans les plaines de la Mitidja durant l'année (1972/1973), la même période de sécheresse (1978-1996) a été marqué le Maroc par (El ibrahimi et al 2015). En Espagne (Vicente-Serrano et Lopez-Moreno 2005) ont montré que la sécheresse a une fréquence différente selon l'échelle de temps utilisée pour l'analyse et il est admis que l'échelle de temps de la SPI est utile pour surveiller les sécheresses dans les différentes ressources en eau utilisables.

D'après ces résultats, il est noté que les plaines du Bas Cheliff, Sidi Bel Abbes et Ghriss sont les plaines les plus touchées par la sécheresse durant la période d'étude et quelque soit l'échelle de temps du SPI, 1983 est l'année quiaenregistré la sécheresse extrême qui corresponda la valeur de -2.9 dans la plaine de Sidi Bel Abbes.

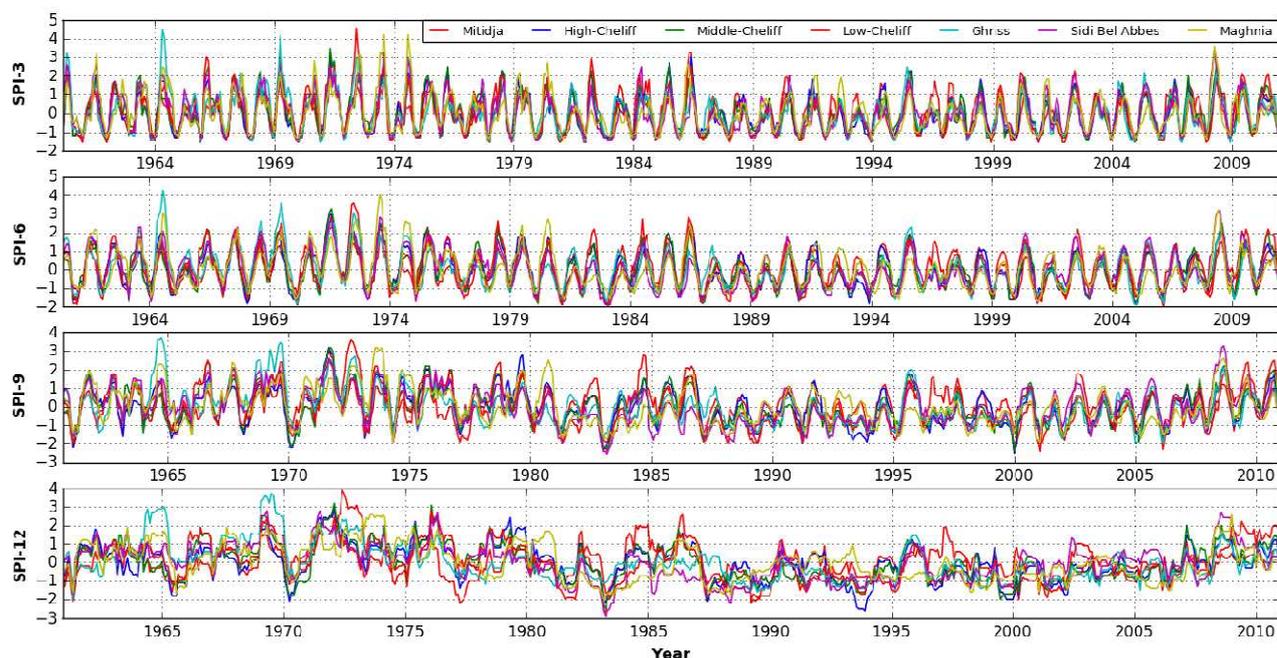


Figure 22 :comparaison des SPIs à différentes échelles de temps pour les sept plaines (1960-2010)

La figure 23 montre une comparaison de la sévérité pour tous les épisodes de sécheresse qui se sont produits à chaque échelle de temps pour les sept plaines au cours de la période étudiée de 1960 à 2010, où la longueur des lignes horizontales représente la durée en mois. Nous distinguons une forte vulnérabilité de la sécheresse dans les plaines de Sidi Bel-Abbès et de Maghnia au cours de la décennie 1980-1990. Ces deux plaines sont situées à l'extrême ouest de l'Algérie, gravement touchées par la sécheresse au cours de cette décennie.

La plaine de Sidi Bel-Abbès a connu les épisodes de sécheresse les plus sévères pour les échelles de 3, 6 et 12 mois. Ils se caractérisent par des sévérités maximales de 11,8, 19,6, 61,4 et une durée maximale de 11, 22 et 59 mois respectivement. Alors qu'à 9 mois, la plaine de Maghnia a connu la sécheresse la plus sévère avec une durée maximale de 43 mois. À des échelles de temps de 6 et de 12 mois, les épisodes de sécheresse ont diminué en durée et en gravité en passant la plaine de Sidi Bel-Abbès, qui représente la région la plus touchée, vers les plaines de Maghnia, du Bas Cheliff, de Ghriss, de Moyen Cheliff et de Mitidja. Enfin, la plaine du Haut Cheliff est la zone qui a été légèrement touchée par de tels événements. Cette plaine se caractérise par un ensemble de montagnes qui joue le rôle de barrière entre la mer

Méditerranée et les hauts plateaux, ainsi que par de fortes précipitations dépassant les valeurs moyennes. De plus, la distribution des épisodes de sécheresse a une gravité similaire à 3 mois et 6 et 12 mois.

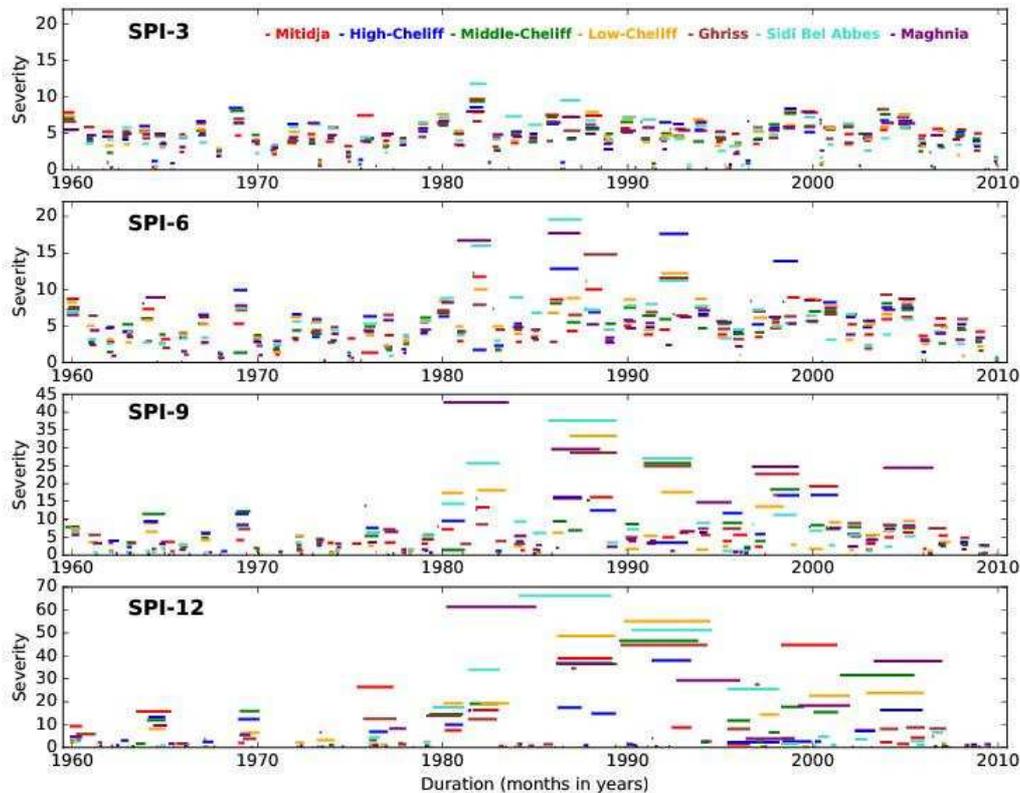


Figure 23 : Occurrence de la sécheresse de 1960 à 2010 dans les sept plaines selon SPI à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois).

2.1-b-2) Etude de la rupture et la tendance dans les séries de SPIs:

Une fois la variabilité de l'évolution spatiale des séries temporelles du SPI (3, 6, 9 et 12 mois) dans les sept plaines analysées. On procède à l'analyse de la variabilité temporelle selon les deux étapes suivantes: le moment des changements brusques dans les séries temporelles du SPI est vérifié à l'aide du test statistique non paramétrique de Pettitt (Pettitt, 1979) après avoir vérifié leur auto-corrélation (le premier coefficient de corrélation en série "lag-1"). Si le coefficient de corrélation en série de lag-1 est significatif à un niveau de 5%, alors la procédure de pré-blanchiment corrigée et non-tendue modifiée sans biais (TFPWcu) pour le test de Pettitt sera utilisée. Cette procédure a été suggérée par Serinaldi et Kilsby (2016) pour supprimer l'effet de l'autocorrélation dans la série temporelle. Dans un deuxième temps, nous avons appliqué le test de Mann-Kendall original non paramétrique (MK) et sa

forme modifiée (MMK) (**Hamed et al. Ramachandra Rao 1998**) pour évaluer l'importance des tendances existantes dans la variabilité à long terme des séries chronologiques de l'SPI.

Il faut d'abord rappeler que dans le test MK, les données sont supposées indépendantes et ordonnées au hasard, ce qui peut conduire à des résultats erronés si la corrélation sérielle est présente (**Hamed et Ramachandra Rao 1998**). Même en l'absence de tendance dans les séries temporelles, l'autocorrélation positive augmenterait les chances de réponse significative. Diverses études ont abordé cette question afin de trouver une approche appropriée qui considère la signification de l'autocorrélation dans les données. Certains auteurs ont suggéré de modifier les données elles-mêmes en utilisant la procédure de pré-blanchiment (**Storch&Navarra 1995**), l'approche pré-blanchiment sans tendance (TFPW) (**Yue et al., 2002**) et les tendances corrigées et non biaisées. Blanchiment (TFPWcu) (**Serinaldi et Kilsby 2016**) afin d'éliminer la corrélation sérielle dans les données. D'autres ont suggéré la correction de la variance du test de Mann-Kendal en utilisant une formule empirique (**Hamed et Rao 1998**) et Monte Carlo Simulations (**Yue et Wang 2004**).

- **Test de Pettitt pour détection de la rupture dans les séries de SPIs :**

Dans cette étude, le test de Pettitt est appliqué pour détecter le point de changement dans les séries temporelles (**Pettitt 1979**). Ce test a été largement appliqué pour détecter un seul point de changement dans des séries hydrologiques et climatiques avec des données continues (**Yue et al., 2002**), (**Ansoumana 2014**). Le test de Pettitt considère qu'une série temporelle d'une suite de variables aléatoires X_t avec $t = 1, 2, \dots, T$, a un point de changement à un pas de temps égal aux valeurs de X_t pour $t = 1, 2, \dots, \tau$ ont la fonction de densité cumulée (CDF) $F_1(x)$, et les valeurs de X_t pour $t = \tau + 1, \tau + 2, \dots, T$ ont la CDF $F_2(x)$ et $F_1(x) \neq F_2(x)$, avec l'hypothèse unique que les deux CDF sont continus (**Yue et al., 2002**). L'hypothèse nulle H_0 , qui suppose qu'il n'y a pas de changement dans la série temporelle X_t , est testée par rapport à l'hypothèse alternative (H_1) du point de changement en utilisant la statistique non-paramétrique définie comme (**Yue et al., 2002**):

$$K_T = \max |U_{t,T}|$$

Où $U_{(t, T)}$ est défini comme la fonction de signe (sgn) entre la différence de chaque paire de valeur des deux séquences X_i et X_j :

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \dots \dots \dots (33)$$

Avec la fonction de signe: $\text{sgn}(y) = 1$ si $y > 0$, 0 si $y = 0$, -1 si $y < 0$. Le point de changement de la série est situé à K_T , à condition que la statistique non paramétrique soit significative (Yue et al., 2002): La probabilité de signification (p) associée à la valeur K_T est approximativement donnée par (Yue et al., 2002):

$$p \approx 2 \exp\left(\frac{-6 K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \dots \dots \dots (34)$$

Lorsque p est plus petit que la probabilité de signification spécifique, par exemple $p = 0,05$ dans cette étude, l'hypothèse nulle est rejetée (Yue et al., 2002):.

- **TFPWcu adapté pour le test de Pettitt:**

Pour corriger le problème du test de Pettitt dans le cas de présence d'une dépendance sérielle dans la série chronologique, Serinaldi et Kilsby (2016) ont suggéré la procédure TFPWcu corrigée et non biaisée pour le test de Pettitt. L'objectif de cette approche est de supprimer l'effet de l'autocorrélation. La détermination du point de changement par cet algorithme nécessite les étapes suivantes mentionnées par Serinaldi et Kilsby (2016):

- 1- Si la valeur de K_T obtenue par le test de Pettitt en utilisant les données d'origine est significative, alors la position τ du point de changement possible est utilisée pour diviser la série temporelle en deux sous-séries (avant et après τ). La différence des médianes ou des moyennes, $\hat{\mu}_b$ et $\hat{\mu}_a$, des deux sous-séries est calculée comme $\Delta = \hat{\mu}_b - \hat{\mu}_a$, et utilisée pour supprimer le changement d'échelon comme suit (Serinaldi et Kilsby, 2016):

$$x_t = y_t - \Delta \cdot 1_{\{t > \tau\}} \dots \dots \dots (35)$$

Où $1_{\{\cdot\}}$ est la fonction de l'indicateur. x_t et y_t sont les données après la suppression de changement d'étape et les données d'origine avant le retrait de changement d'étape respectivement, à l'instant t dans la série temporelle (Serinaldi et Kilsby, 2016). La valeur de l'autocorrélation de lag-1 de x_t est estimée et corrigée pour le biais en utilisant des corrections de biais en deux étapes. Au premier stade, il est corrigé pour l'autocorrélation du processus fractionnel gaussien (fGn) ou du processus de Hurst-Kolmogorov comme suit (Koutsoyiannis 2003):

$$\rho_K^* = \hat{\rho} \left(1 - \frac{1}{T'}\right) + \frac{1}{T'} \dots \dots \dots (36)$$

Où T' est la taille effective de l'échantillon pour le processus autorégressif de premier ordre [AR (1)] et peut être obtenu comme suit (**Koutsoyiannis et Montanari 2007**):

$$T' = T \frac{(1 - \rho)^2}{(1 - \rho^2) - 2\rho(1 - \rho^T)/T} \dots \dots \dots (37)$$

Le calcul de la correction des biais du second degré peut être effectué de la même manière que Marriott et Pope (1954), mais en utilisant les formules généralisées suivantes suggérées par Mudelsee (2001):

$$E[\hat{\rho}] \simeq E[\hat{\rho}]_W = \left(1 - \frac{2}{n} + \frac{4}{n^2} - \frac{2}{n^3}\right)\rho + \frac{2}{n^2}\rho^3 + \frac{2}{n^2}\rho^5 \text{ for } \rho < 0.88 \dots \dots \dots (38)$$

$$E[\hat{\rho}] \simeq E[\hat{\rho}]_M = \rho - \frac{2\rho}{(n-1)} + \frac{2}{(n-1)^2} \frac{(\rho - \rho^{2n-1})}{(1 - \rho^2)} \text{ for } \rho \geq 0.88 \dots \dots \dots (39)$$

Après obtention du coefficient d'autocorrélation de lag-1 corrigé de biais $\hat{\rho}^*$, la structure AR (1) est enlevée pour obtenir des séries non corrélées ε'_t de résidus comme suit (**Mudelsee 2001**):

$$\varepsilon'_t = x_t - \hat{\rho}^* x_{t-1} \dots \dots \dots (40)$$

Enfin, une série pré-blanchie x''_t est obtenue en combinant des séries non corrélées de résidus et de changement de pas. La série pré-blanchie suivante est utilisée pour examiner l'importance du point de changement en utilisant le test de Pettitt (**Mudelsee, 2001**):

$$x''_t = \Delta \cdot 1_{\{t > \tau\}} + \frac{\varepsilon'_t}{1 - \hat{\rho}^*} \dots \dots (41)$$

- **test de Mann–Kendall modifier (MMK)**

Le test de Mann-Kendall (**Kendall 1975, Mann 1945**) est un test de tendance non paramétrique couramment utilisé. Cependant, l'hypothèse nulle est que les données sont indépendantes et aléatoires. Cependant, des études de simulation révèlent que l'existence d'une autocorrélation positive dans les données augmente la probabilité de détecter une tendance alors qu'elle n'existe pas réellement, et qu'une autocorrélation négative rend trop difficile la recherche d'une tendance significative (**Kendall 1975, Mann 1945**). Hamed et Rao (1998) ont dérivé une formule empirique pour modifier le test de Mann-Kendall afin d'éliminer l'influence de la corrélation sérielle. Les statistiques sont du test de Mann-Kendall modifié données par:

$$S = a_{ij} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \dots \dots \dots (42)$$

Où:

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

L'importance des tendances est testée en comparant la statistique de test normalisée $Z = S/\sqrt{V^*(S)}$ avec la variable normale standard au niveau de signification souhaité. La variance modifiée $V^*(S)$ est calculée par:

$$V^*(S) = V(S) \cdot \frac{n}{n_s^*} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \frac{n}{n_s^*} \dots \dots \dots (43)$$

Où n/n_s^* représente une correction factorielle due à la corrélation sérielle dans les données (**Hamed et Rao, 1998**). Ce facteur n/n_s^* est obtenu par une approximation des valeurs théoriques de l'expression empirique ci-dessous (**Hamed et Rao, 1998**):

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i) \dots \dots \dots (44)$$

Où n est le nombre réel d'observations et $\rho_s(i)$ est la fonction d'autocorrélation des rangs d'observation (**Hamed et Rao, 1998**). Le résultat du test, qui est la statistique de test standardisée Z , donne des informations sur la stationnarité de la série temporelle et la nature de la tendance à long terme (augmentation ou diminution) (**Hamed et Rao, 1998**).

- **Résultat de l'analyse des tendances et des changements dans les série de SPI :**

L'enquête précédente montre que les sept plaines sont été soumises à une sécheresse persistante dernières décennies, bien que l'intensité de cette sécheresse change d'une plaine à l'autre. Dans ce qui suit, on vérifie l'occurrence des ruptures et les tendances des valeurs moyennes de SPI pour expliquer la persistance de cette sécheresse. Les différentes séries temporelles de SPI (3, 6, 9 et 12 mois) dans les sept plaines a été vérifiée pour l'autocorrélation avant appliquée des tests de tendance et de rupture. le coefficient de corrélation de la série de pas de temps 1 pour toutes les séries de SPI était calculé pour la période d'étude et les résultats de coefficients d'autocorrélation de pas de temps 1 ($\hat{\rho}$) sont

présentés dans la figure 24. Ainsi, toutes les séries chronologiques du SPI se trouvent être auto-corrélée au décalage-1 au niveau de 5% (pour tous valeurs $p < 0.05$).

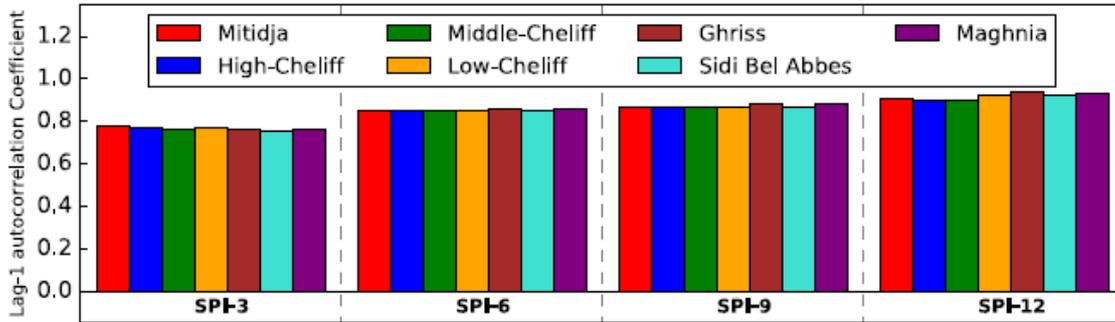


Figure 24 : Coefficients d'autocorrélation Lag-1 ($\hat{\rho}$) pour la série SPI dans les sept plaines (1960-2010) à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois)

Premièrement, nous identifions les points de changement pour les différentes échelles de temps en utilisant le test de Pettitt original. Dans le tableau 17, les résultats de la statistique de test K_T , p-value et l'année où le point de changement sont présentés. Le point de changement a été identifié à 5% à la fin des années 1970 et au début des années 1980 pour toutes les échelles de temps du SPI sauf pour la plaine de Mitidja où le point de changement s'est produit dans la seconde moitié de la décennie des années 1980. Jusqu'à présent, l'effet d'autocorrélation n'est pas supprimé. Pour supprimer l'effet de l'autocorrélation dans la série temporelle, nous avons appliqué le test de Pettitt modifié après pré-blanchiment des séries SPI en utilisant la technique TFPWcu. Pour le test de Pettitt utilisant TFPWcu comme suggéré par Serinaldi et Kilsby (2016), les séries temporelles auto-corrélées SPI aux échelles de temps de 3, 6, 9 et 12 mois ont été divisées en deux sous-séries basées sur un éventuel changement identifié par le test original de Pettitt. La différence de moyenne (Δ), lag-1 autocorrélation ($\hat{\rho}$) après élimination du décalage, première phase corrigée ρ_k^* et deuxième phase corrigée ($\hat{\rho}^*$) les coefficients d'autocorrélation de lag-1 sont présentés dans le tableau 17.

Après l'élimination de l'autocorrélation on peut voir dans le tableau 17 que le coefficient d'autocorrélation a considérablement diminué. Ensuite, les séries de SPI corrigées ont été testées pour le point de changement en utilisant le test de Pettitt. Les résultats du test de Pettitt appliqué à 5% de signification ont été modifiés par rapport aux résultats appliqués sur la série SPI d'origine où les valeurs de K_T sont diminuées tandis que les valeurs de p sont augmentées. En outre, on peut observer qu'à 3 et 6 mois, aucun points de changement de la

nouvelle série SPI n'a été reproduit. Néanmoins, les points de changement ont été reproduits pour toutes les nouvelles séries SPI à l'échelle de 9 et 12 mois à la fin des années 1970 et au début des années 1980 avec un léger changement, soit avant ou après le changement principal, sauf pour la Mitidja et les plaines de Bas Cheliff où aucun point de changement n'a été remarqué à l'échelle de 9 mois.

Par exemple, pendant 12 mois, la plaine de Ghriss a d'abord enregistré un changement du SPI avril-février 1976. Au niveau des plaines de Sidi Bel-abbes, de bas, moyen et Haute Cheliffes séries SPI ont tous identifié un changement dans la même période à savoir de novembre à octobre 1979. Après, la série de SPI de la plaine de Maghnia a été témoin du changement dans SPI Dec-Nov 1980 et enfin la plaine de Mitidja dans le SPI Dec-Nov 1986.

Tableau 17 : Point de changement des valeurs moyennes des séries SPI par le test de Pettitt original et modifié é en utilisant TFPWcu pour la période 1960-2010 à un niveau de signification de 5%.

Plain	Pettitt test original			Pettitt test Modifier utilisant TFPWcu							
	Kt	Year	P-value	Δ (mm)	$\hat{\rho}$	ρ_k^*	$\hat{\rho}^*$	ρ	Kt	Year	P-value
SPI-3											
MITIDJA	9092	No break	0.231	0.206	0.731	0.734	0.731	0.27	4278	No break	1.236
HIGH CHELIFF	12571	SPI _{OND} 1980	0.032	0.274	0.737	0.740	0.738	0.31	4374	No break	1.210
MIDDLE CHELIFF	14314	SPI _{SON} 1979	0.010	0.312	0.722	0.725	0.723	0.29	4808	No break	1.089
LOW CHELIFF	14142	SPI _{SON} 1979	0.011	0.283	0.739	0.742	0.739	0.31	4642	No break	1.135
GHRISS	17409	SPI _{JAS} 1976	0.001	0.470	0.719	0.722	0.719	0.24	7476	No break	0.460
SIDI BEL ABBES	19471	SPI _{SON} 1979	0.000	0.416	0.713	0.716	0.714	0.26	8978	No break	0.240
MAGHNIA	19115	SPI _{OND} 1980	0.000	0.428	0.716	0.719	0.716	0.22	9068	No break	0.230
SPI-6											
MITIDJA	14146	SPI _{Oct-Mar} 1986	0.009	0.297	0.8153	0.818	0.816	0.35	5732	No break	0.833
HIGH CHELIFF	24605	SPI _{Nov-Apr} 1980	< 0,0001	0.388	0.8182	0.821	0.819	0.36	7229	No break	0.496
MIDDLE CHELIFF	29227	SPI _{Dec-Mar} 1980	< 0,0001	0.427	0.8086	0.812	0.809	0.31	7652	No break	0.420
LOW CHELIFF	19685	SPI _{Oct-Mar} 1980	< 0,0001	0.396	0.8266	0.830	0.827	0.38	7003	No break	0.541
GHRISS	26567	SPI _{Sep-Feb} 1976	< 0,0001	0.664	0.8117	0.815	0.812	0.28	10219	No break	0.123
SIDI BEL ABBES	29366	SPI _{Oct-Mar} 1979	< 0,0001	0.592	0.8169	0.820	0.817	0.29	10797	No break	0.089
MAGHNIA	29227	SPI _{Dec-May} 1980	< 0,0001	0.606	0.8174	0.820	0.818	0.29	10975	No break	0.080
SPI-9											
MITIDJA	23868	SPI _{Dec-Aug} 1986	< 0,0001	0.45	0.83	0.84	0.84	0.21	9680	No break	0.159
HIGH CHELIFF	31030	SPI _{Dec-Aug} 1986	< 0,0001	0.57	0.83	0.84	0.83	0.20	12950	SPI _{Oct-Jun} 1986	0.021
MIDDLE CHELIFF	34156	SPI _{Dec-Aug} 1979	< 0,0001	0.68	0.83	0.83	0.83	0.17	13854	SPI _{Aug-Apr} 1984	0.011
LOW CHELIFF	30982	SPI _{Dec-Aug} 1980	< 0,0001	0.59	0.85	0.85	0.85	0.29	11408	No break	0.059
GHRISS	42128	SPI _{Oct-Jun} 1976	< 0,0001	0.97	0.84	0.84	0.84	0.16	14458	SPI _{Jan-Sep} 1976	0.007
SIDI BEL ABBES	43513	SPI _{Nov-Jul} 1979	< 0,0001	0.85	0.83	0.83	0.83	0.13	16022	SPI _{Aug-Apr} 1976	0.002
MAGHNIA	43850	SPI _{Feb-Oct} 1981	< 0,0001	0.87	0.85	0.85	0.85	0.19	16872	SPI _{Oct-Jun} 1980	0.001
SPI-12											
MITIDJA	31534	SPI _{Mar-Feb} 1987	< 0,0001	0.642	0.861	0.864	0.861	-0.10	14727	SPI _{Dec-Nov} 1986	0.005
HIGH CHELIFF	42424	SPI _{Mar-Feb} 1979	< 0,0001	0.795	0.867	0.870	0.867	-0.03	15418	SPI _{Nov-Oct} 1979	0.003
MIDDLE CHELIFF	45200	SPI _{Jan-Dec} 1980	< 0,0001	0.933	0.865	0.868	0.866	-0.03	17026	SPI _{Nov-Oct} 1979	0.001
LOW CHELIFF	42293	SPI _{Jan-Dec} 1980	< 0,0001	0.853	0.897	0.901	0.898	0.01	14386	SPI _{Nov-Oct} 1979	0.007

GHRISS	57928	SPI _{Nov-Oct} 1976	< 0,0001	1.306	0.896	0.899	0.896	-0.11	24741	SPI _{Apr-Feb} 1976	< 0,0001
SIDI BEL ABBES	57882	SPI _{Dec-Nov} 1979	< 0,0001	1.111	0.885	0.888	0.885	-0.05	21581	SPI _{Apr-Feb} 1979	< 0,0001
MAGHНИЯ	57484	SPI _{Mar-Feb} 1981	< 0,0001	1.144	0.899	0.902	0.899	-0.07	22817	SPI _{Dec-Nov} 1980	< 0,0001

Nous notons que, pour toutes les plaines, après le point de changement, la série SPI tendra significativement vers des conditions sèches (les tendances négatives) ce qui est confirmé dans les résultats montrés dans la figure 22 où la durée des événements de sécheresse a augmenté et est devenue plus sévère en commençant par la plaine de Sidi Bel-Abbes et celle du Maghnia en 1980. Pour les séries temporelles qui n'ont pas montré de point de changement (échelle de temps de 3 et 6 mois), la tendance à la sécheresse par MMK n'est pas significative au seuil de signification de 5%.

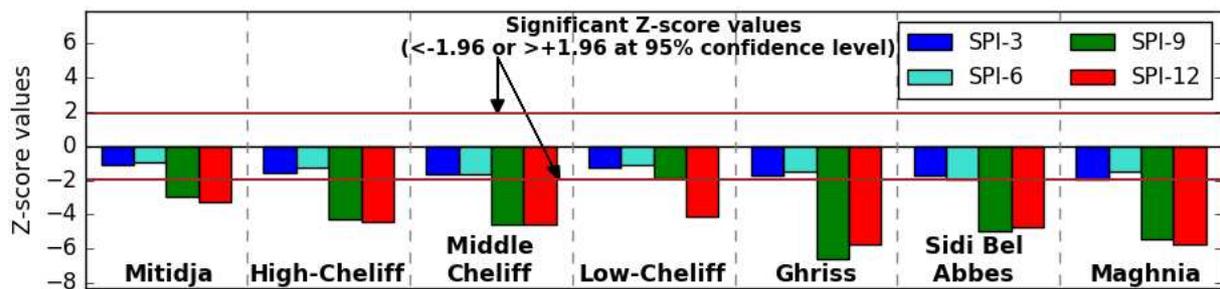


Figure25: Les Z scores issus de la méthode MMK pour les séries SPI dans les sept plaines (1960-2010) à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois). Les deux lignes rouges représentent les valeurs théoriques critiques n du test MMK à 5% niveau de probabilité.

- **Discussion de l'analyse de la variabilité temporelle:**

L'analyse de la variabilité temporelle dans les sept plaines à l'aide de la série d'SPI et de leurs caractéristiques, à savoir la gravité de la sécheresse et sa durée à 3, 6, 9 et 12 mois, ont montré trois résultats significatifs majeurs:

- 1- En ce qui concerne la caractérisation spatio-temporelle de la sécheresse, des épisodes de sécheresse se sont encore produits et se caractérisent par une sévérité et une augmentation de la durée de toutes les plaines étudiées à la fin des années 1970, au début des années 1980 et à la fin des années 1980, à l'exception des plaines de Ghriss et de Sidi Bel-Abbés. Où elle a été enregistrée au cours de la première moitié des années 2000. Ces épisodes de sécheresse ont été confirmés, entraînant une diminution des rendements et la baisse du niveau des eaux ainsi que des niveaux minimum d'eau

dans les barrages, en particulier dans l'ouest du pays. Au cours des périodes susmentionnées du SPI à différentes échelles de temps, la phase la plus sèche se situait dans l'extrême ouest de l'Algérie: les plaines de Maghnia, de Ghriss et de Sidi Bel-Abbés. Ils ont connu un déficit pluviométrique important et ont provoqué un besoin d'une irrigation considérable pour soutenir la production agricole. Ces régions sont connues pour leur fertilité et leur productivité. **Abdelhamid et al., (2015)** ont trouvé les mêmes résultats dans le nord du Maroc (plaine du Saïss). Selon le cinquième rapport du GIEC (**Stocker et al. 2013; Dai et al., 2004**), l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses dans la zone entourant la mer Méditerranée est due au changement climatique qui implique des températures plus chaudes, des régimes de précipitations modifiés et augmentation de la variabilité climatique. De plus, ces observations ont été confirmées par la variabilité temporelle de l'analyse de la sécheresse, réalisée par le biais du SPI, à l'aide de nombreux tests statistiques qui ont montré, pour toutes les échelles de temps et toutes les plaines, l'augmentation du nombre et de l'intensification des zones sèches.

- 2- Les résultats ont également révélé l'influence de la corrélation en série dans les séries chronologiques pour la détection des tendances et des points de changement. Lorsque les tendances vers des conditions sèches lorsque les séries temporelles de SPI pré-blanchies sur différentes échelles de temps ne deviennent significatives qu'à des échelles de 9 et 12 mois. Même chose pour les points de changement, où elles ont été reproduites sur les séries du SPI pré-blanchies uniquement en séries de 9 et 12 mois avec une légère modification, si précéder ou poursuivre le point de changement principal. Ces résultats sont donc confirmés par les études existantes (**Onyutha, 2016; Piyooch et Ghosh, 2017**) dans lesquelles la corrélation en série est reconnue pour avoir un impact sur la détection des tendances dans les séries chronologiques auto-corrélées, ce qui peut fausser les tests pour détecter les tendances et les points de changement. Les points de changement ont indiqué que la montée des épisodes de sécheresse n'était significative que pendant la seconde moitié des années 1970, le début des années 1980 et la fin de la décennie 1980 à des échelles de 9 et 12 mois. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes montrant une augmentation de la fréquence, de la durée et de la gravité de la sécheresse dans la partie méridionale du bassin méditerranéen dans la seconde moitié du XXe siècle (**Hoerling et al. 2012; Peñuelas et al. 2001; Spinoni et al. 2014; Ramadan et al. 2013; Trambly et al. 2013**). De même, **Hoerling et al (2012)** ont signalé l'évolution des précipitations de la

région méditerranéenne pendant la saison froide de 1902 à 2010 et l'intensification de cette tendance à des conditions plus sèches avec une fréquence de sécheresse accrue après 1970. De plus, **Mariotti (2010)** a constaté que la région méditerranéenne a connu dix des douze hivers tardifs depuis 1902, au cours des vingt dernières années seulement. Des résultats similaires ont été obtenus séparément pour des études locales dans la région méditerranéenne et dans d'autres régions semi-arides comme **Raymond et al. (2016)** pour le nord de l'Algérie, **Abenavoli et al. (2016)** et **Maccioni et al. (2015)** en Italie, **Dabanlı et al. (2017)** en Turquie, **Estrela et Vargas (2012)** en Espagne et **Bari Abarghouei et al. (2011)** en Iran.

- 3- En ce qui concerne la distribution spatiale, la gravité des épisodes de sécheresse s'amplifie d'est en ouest et est plus marquée à 9 mois et à l'échelle annuelle. Ces effets peuvent s'expliquer par la localisation géographique des plaines, c'est-à-dire l'extrême ouest du bassin méditerranéen influencé par les variations atlantiques et les anticyclones des Açores, où se situent les plaines de Maghnia, Sidi Bel-Abbés et Ghriiss. Ces circulations atmosphériques produisent généralement un climat climatique paisible et des conditions sèches (**Xoplaki et al., 2004**). Les plaines du Cheliff et de la Mitidja se situent dans le bassin méditerranéen occidental et oriental, influencées par le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO) révélé lors d'études antérieures (**Meddi et al., 2010; Zeroual et al., 2017**).

3) Indice de risque de sécheresse (Drought Hazard Index DHI) :

La gravité de la sécheresse dépend de la durée, l'intensité, la fréquence, et l'ampleur des épisodes de sécheresse spécifiques (**Rezaei et al. 2013**). Un modèle complet d'évaluation des risques de la sécheresse doit être en mesure de refléter pleinement les multiples caractéristiques de la sécheresse.

A cet effet, un modèle d'évaluation du danger de la sécheresse est développé sur la base du SPI (**Kossida et Mimikou, 2013**). L'approche méthodologique pour l'estimation DHI est basé sur la méta-analyse de l'SPI 12 calculé pour la sécheresse caractérisant de la région (**Kossida et Mimikou, 2013**).

Selon la définition donnée par **McKee et al. (1993)**, un épisode de sécheresse se produit lorsque SPI_{12} est continuellement négatif sur certaine période et atteint une valeur de -1,0 ou moins dans cette période; en continu des valeurs de SPI_{12} négatives de ne pas atteindre une

valeur moins de -1.0 ne reconnaissent pas un épisode de sécheresse. Basé sur les valeurs SPI_{12} , pour chaque station et en considérant une période de référence, quatre sous-indicateurs sont estimés, tel que proposé par **Kossida et Mimikou (2013)**, ce qui reflète (1) le nombre d'épisodes de sécheresse (FRQ) observée dans la période de référence; (2) le nombre d'événements de la sécheresse d'une durée supérieure à 24 mois (FRQ24) comme raisonnable descripteur d'événements prolongés dans le climat méditerranéen; (3) l'intensité maximale observée (DMmax) de l'amplitude de la sécheresse (DM) à travers les épisodes; (4) la durée maximale (dmax) de mois à travers les épisodes de sécheresse.

En ce qui concerne le calcul du DM de chaque événement, utilisé pour l'indicateur de sous DM max décrit précédemment, la relation a suggéré par **McKee et al. (1993)** est utilisé

$$DM = (\sum_{j=1}^x SPI_{12j} \dots \dots \dots) (45)$$

où j commence avec le premier mois d'un épisode de sécheresse, identifié lorsque le SPI_{12} Tombe d'abord en dessous de zéro, et se poursuit avec les valeurs négative jusqu'à ce que la Première valeur positive de SPI_{12} , x , est atteinte (fin de sécheresse) **McKee et al. (1993)**.

Pour chaque sous-indicateur, les seuils sont élaborés dans la région d'étude, et quatre classes différentes avec des scores relatifs de 1 à 4 (moins plus vulnérables) sont définies en subdivisant les valeurs des intervalles égaux. Ensuite, les poids appropriés (θ_i) sont attribué à chaque sous-indicateur en utilisant un processus analytique hiérarchique (AHP)

(**Saaty 1977**), qui est une méthode d'évaluation de poids largement utilisé dans une variété des questions de prise de décision. Enfin, les sous-indicateurs sont mélangés dans le DHI, cartographié, et classés dans la zone d'étude. Le résultant DHI est :

$$DHI = \vartheta_1 [score(DMmax)] + \vartheta_2 [score(dmax)] + \vartheta_3 [score(FRQ)] + \vartheta_4 [score(FRQ24)] \dots \dots \dots (46)$$

Tel que: ϑ_i sont des poids

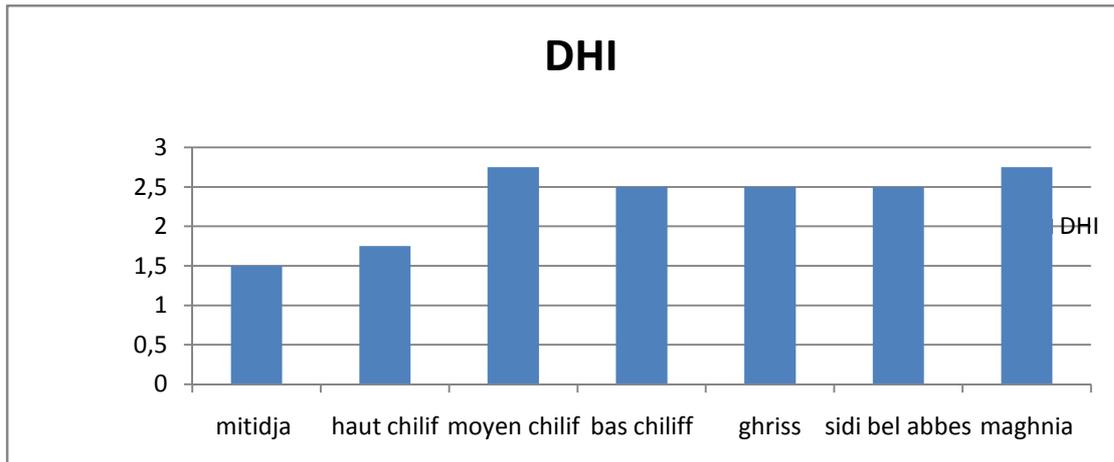


Figure 26 : la présentation graphique par histogrammes de l'Indice de risque de sécheresse (DHI) pour les sept plaines de la région d'étude

La figure 26 donne la présentation graphique par histogrammes de l'Indice de risque de sécheresse (DHI) pour les sept plaines de la région d'étude, on remarque que le DHI est plus fort dans les deux plaines du Moyen Cheliff et de Maghnia ce qui signifie que le risque de la sécheresse est plus élevé dans ces deux plaines (dépassé les 2.5), alors que il est faible dans la plaine de Mitidja (DHI est 1.5). Les plaines du Bas Cheliff, Ghriss et de Sidi Bel Abbès ont le même risque de sécheresse pour un DHI est 2.5.

3.1) La variation spatiale de la sécheresse par le DHI :

La figure 27 montre la variation spatiale de la sécheresse dérivée de valeurs de DHI maillées en utilisant Surfer 10 et Mapinfo 11 avec l'aide de l'interpolation par la Méthode «IDW». L'analyse spatiale a été réalisée pour déterminer les plaines les plus touchées par la sécheresse.

La carte de la figure 27 montre un déficit pluviométrique où le DHI varie entre 2.25 et 2.5 dans les plaines du moyen et du bas Cheliff, Sidi Bel Abbès et de Maghnia ce qui signifie que ces régions sont très vulnérables à la sécheresse. On observe une vulnérabilité extrême dans la plaine de Ghriss où le DHI atteint une valeur critique de 2.75. Par contre, le DHI atteint des valeurs plus petites, 1.75 pour la plaine de Mitidja et une valeur de 2 au niveau de la plaine de Haut Cheliff, ces valeurs expriment que ces plaines ne sont pas vulnérables à la sécheresse.

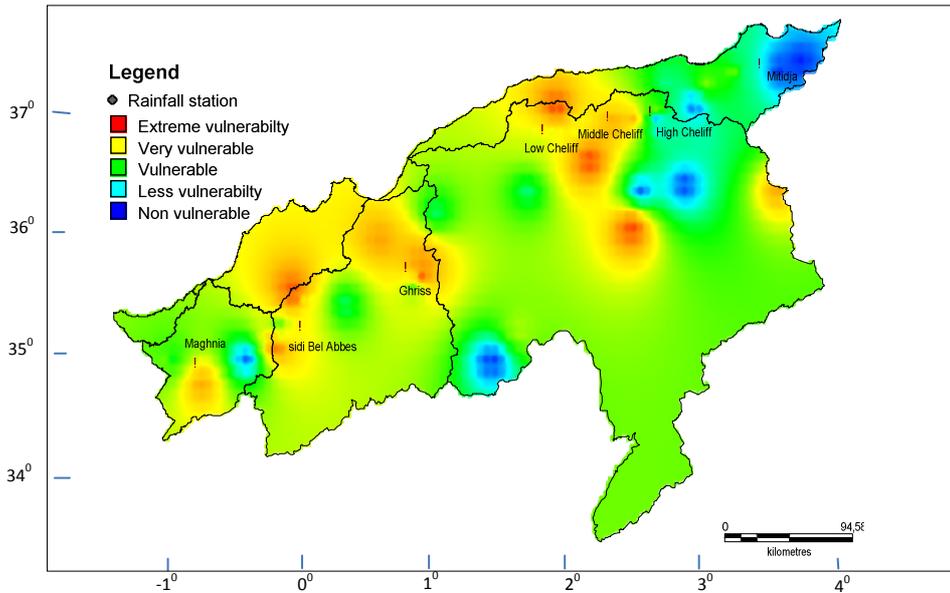


Figure 27 : la variation spatiale de DHI dans les sept plaines

4) **China-Z index (CZI) :**

Le CZI est basée sur la transformation de racine cubique Wilson-Hilferty (Kendall et Stuart, 1977). En supposant que les données des précipitations suivent la distribution de Pearson de type III, l'indice est calculé comme suit (Kendall et Stuart, 1977):

$$CZI_j = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} Q_j + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_6} + \frac{C_6}{6} \dots \dots \dots (47)$$

$$C_s = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^3}{n \times \sigma^3} \dots \dots \dots (48)$$

$$\varphi_j = \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \dots \dots \dots (49)$$

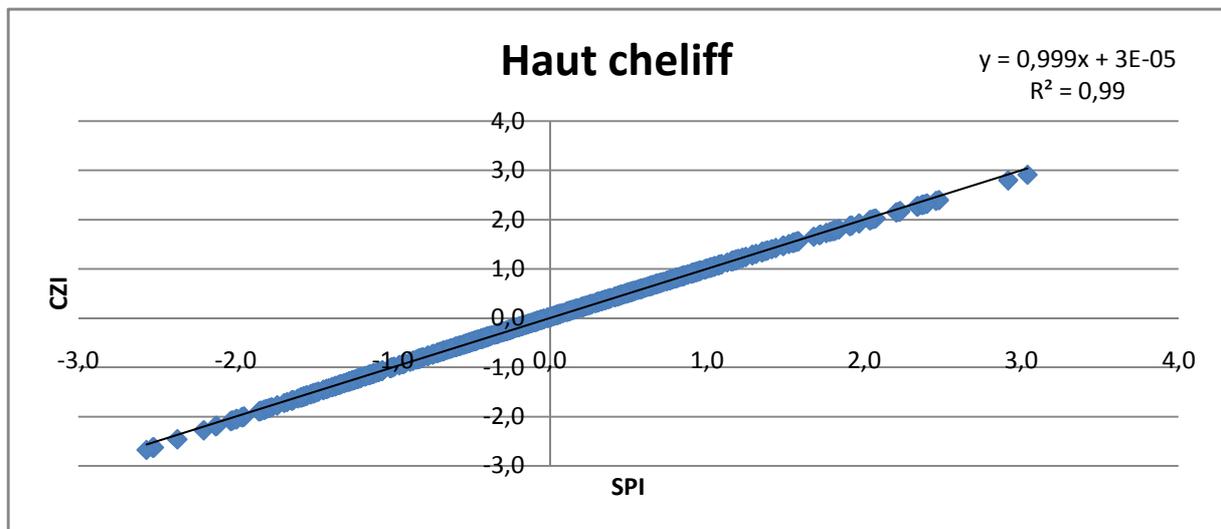
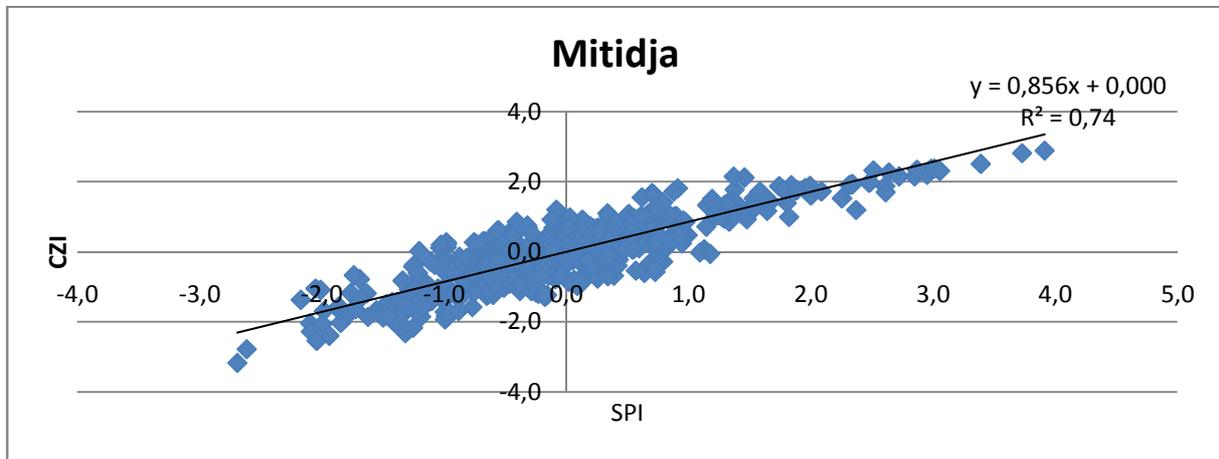
Où j est le mois en cours, C_s est le coefficient d'asymétrie, n est le nombre total de mois, φ_j est variante standard, aussi appelé le Z-score et x_j est la précipitation du j mois.

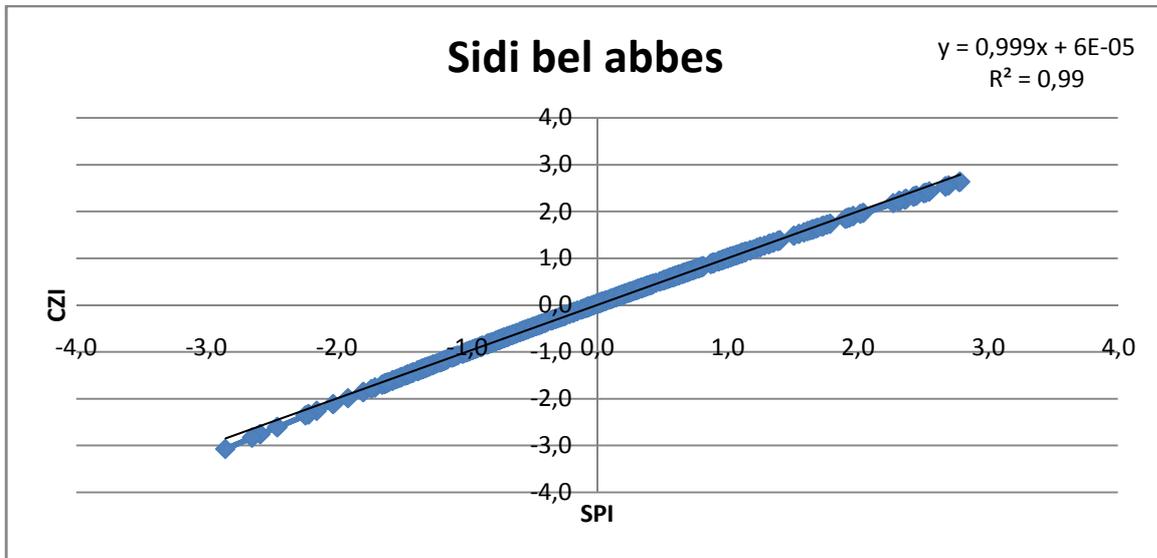
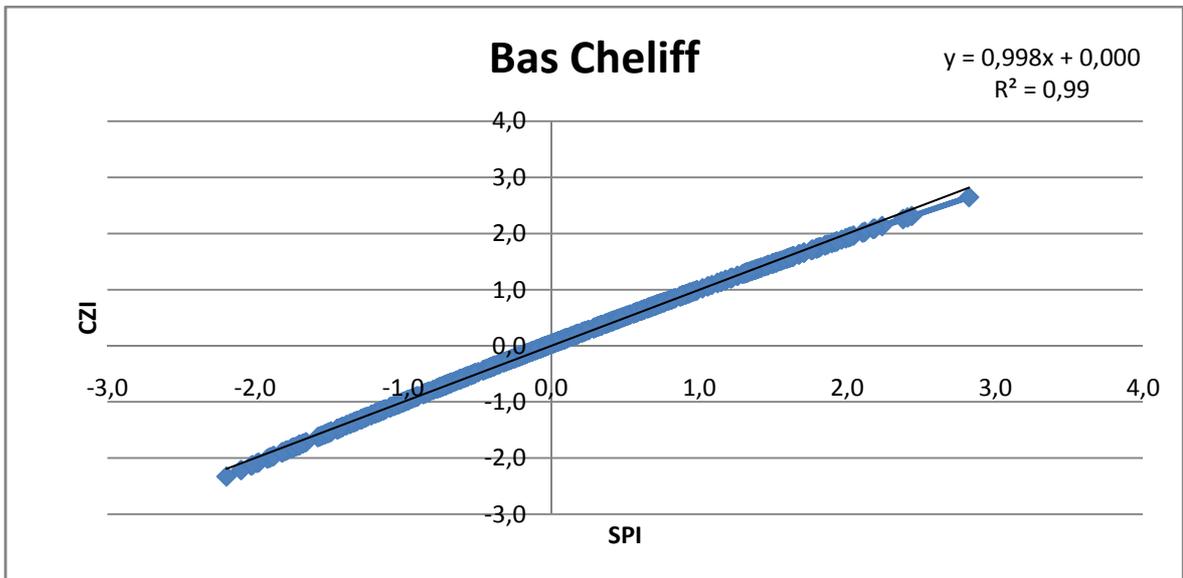
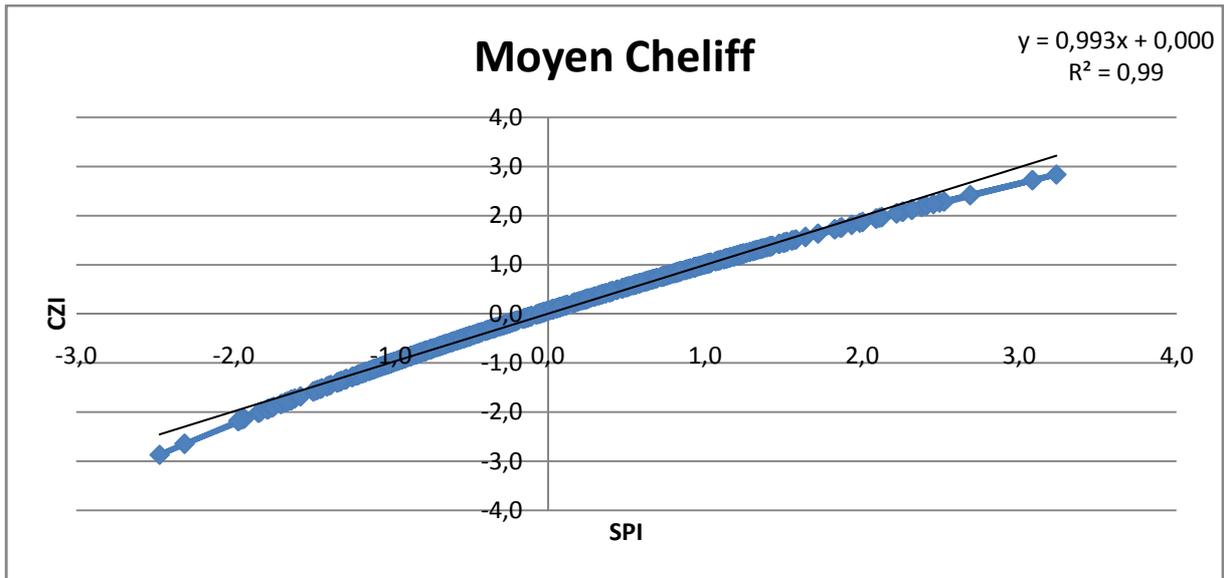
5) **CZI Modifié (MCZI) :**

Pour calculer le MCZI, la précipitation médiane (M) est utilisée à la place des précipitations moyennes dans le calcul de la CZI. Cela a été fait par Wu et al. (2001) dans le but de réduire les différences entre le SPI et le MCZI.

6) Comparaison entre CZI et SPI :

Dans cette partie, le coefficient de corrélation de Pearson (R^2) pour le SPI par rapport au CZI, a été calculé pour les sept plaines. La figure 28 représente la régression linéaire entre les valeurs du SPI et CZI pour la période allant de 1960 à 2010. La valeur indique que les deux indices ont généralement une bonne relation pour toutes les plaines où le coefficient de corrélation de Pearson (R^2) varie entre 0.99 et 0.90 à l'exception de la plaine de Mitidja où le coefficient de corrélation de Pearson (R^2) est faible 0.74. les Divergences augmentent pendant les mois secs, le SPI a tendance à avoir des valeurs négatives plus importantes que le CZI. De manière surprenante, Wu et al. (2001) ont rapporté des valeurs négatives plus importantes pour CZI que pour SPI.





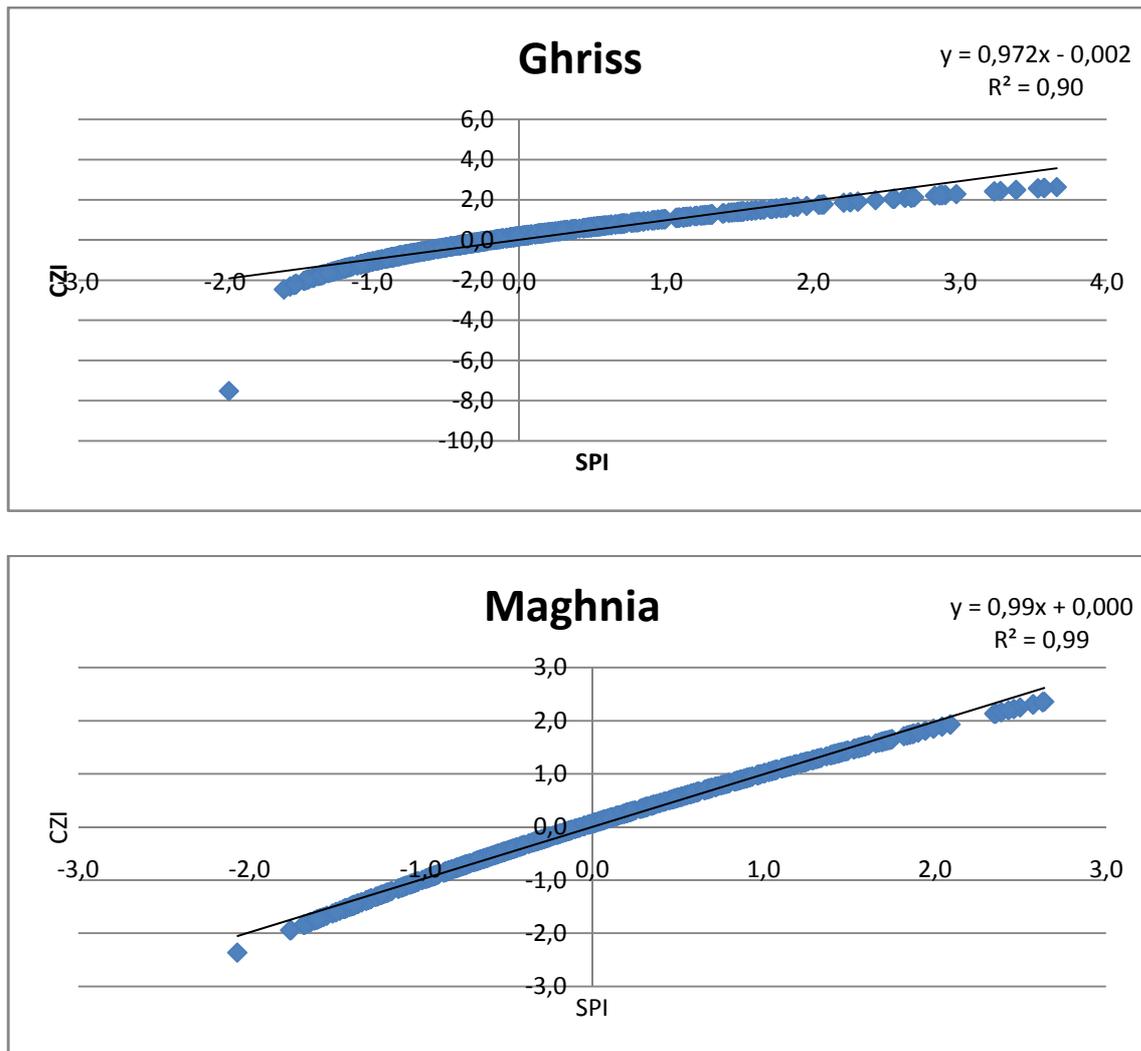
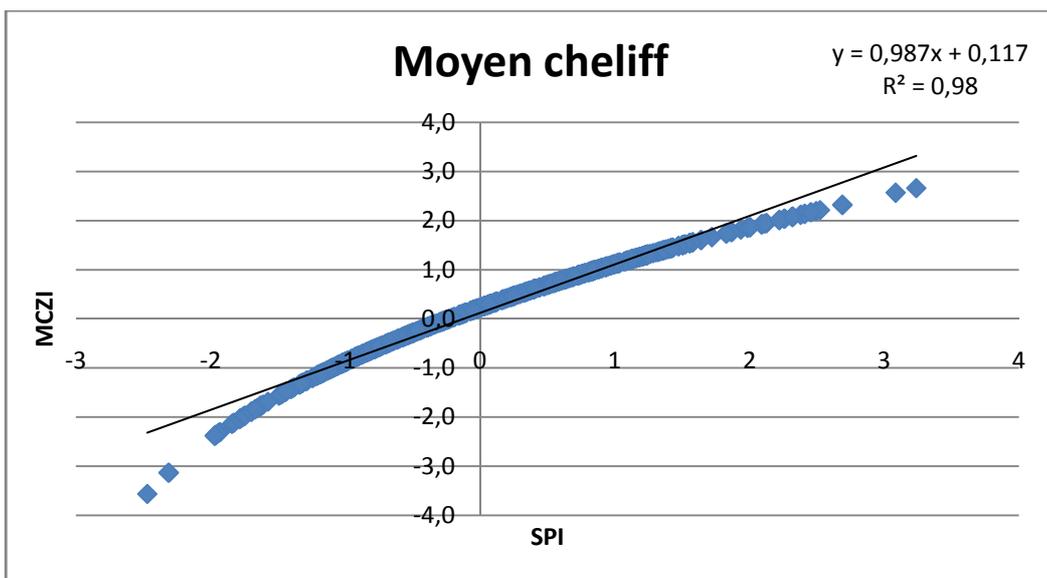
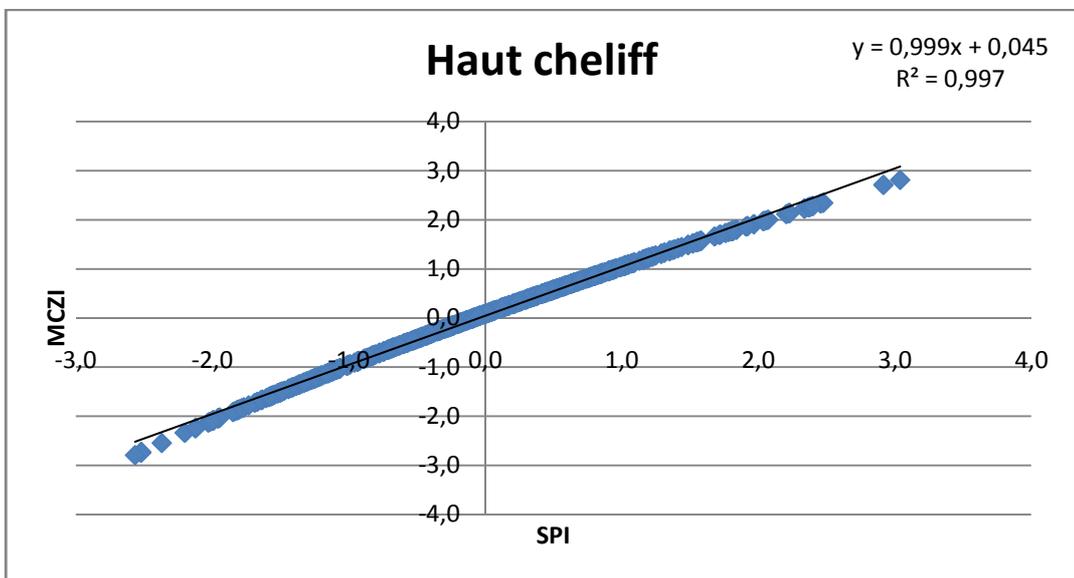
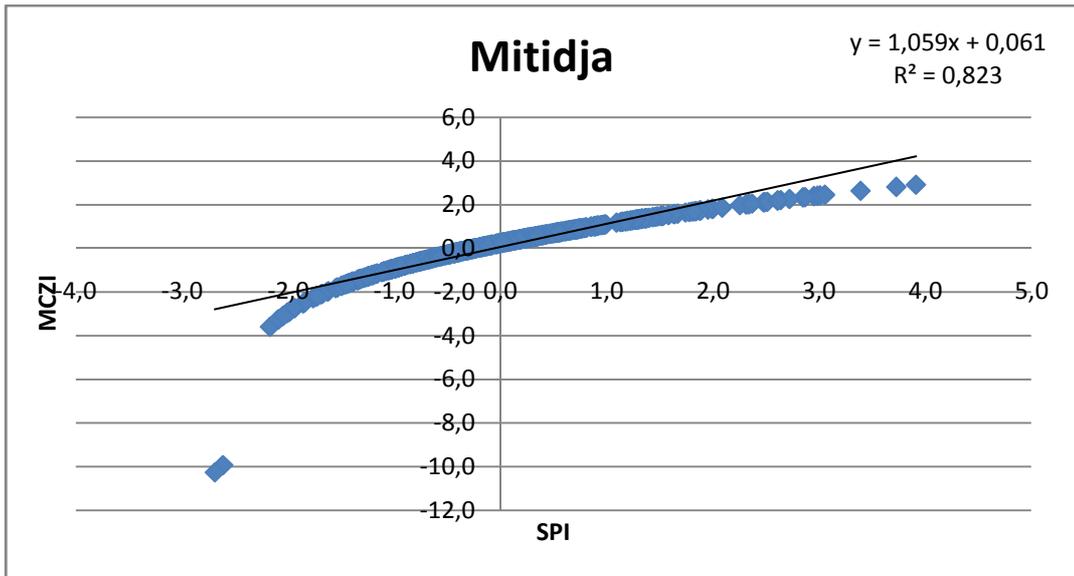
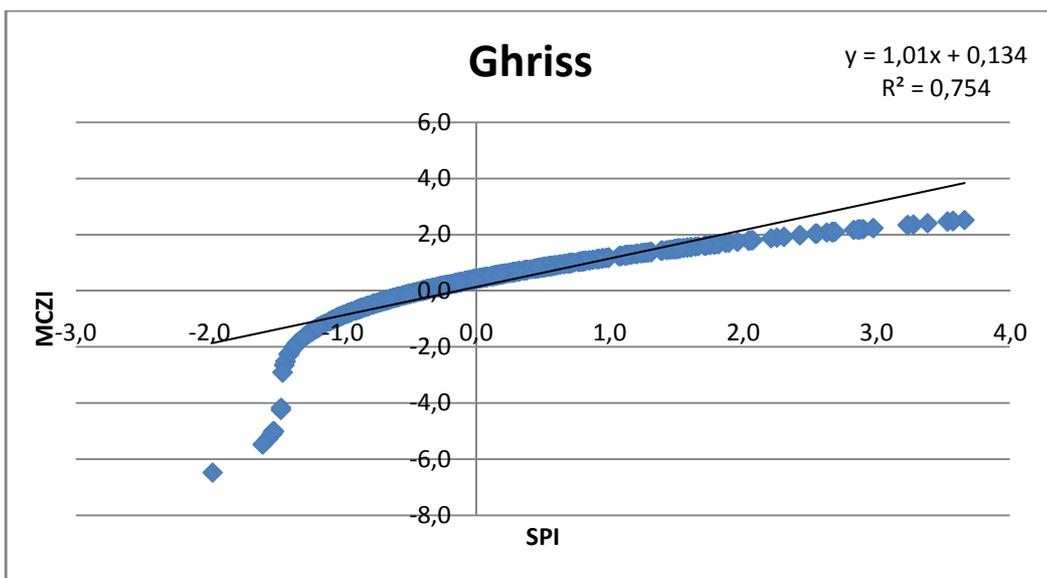
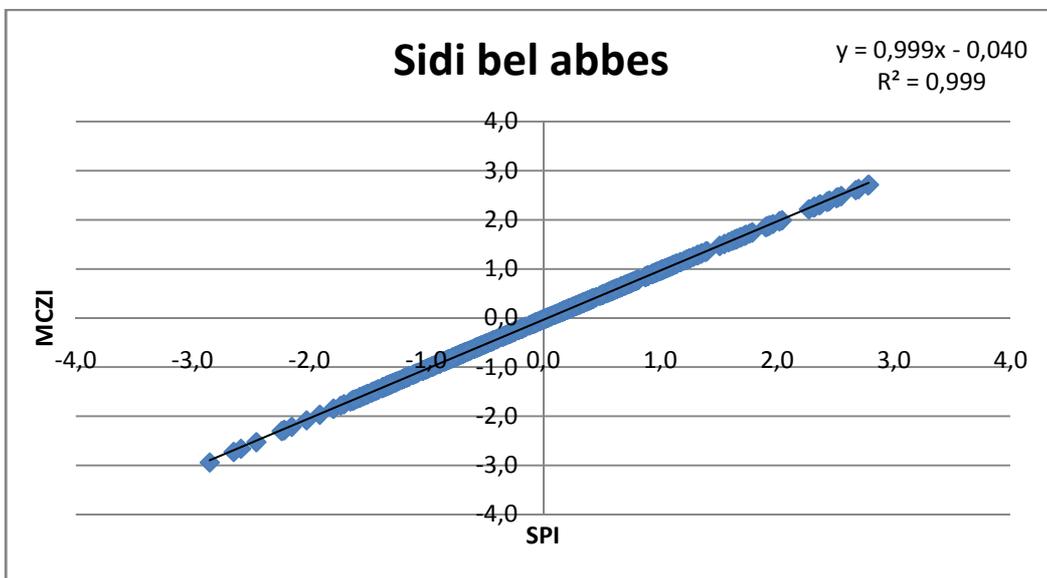
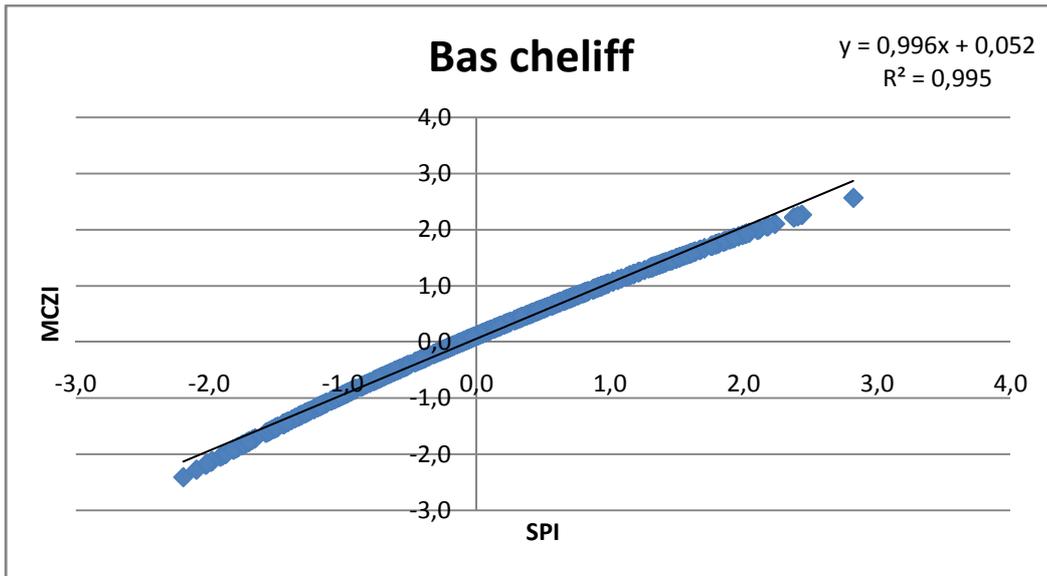


Figure 28: Relation entre le SPI et le CZI pour les sept plaines de 1960 à 2010.

7) Comparaison entre SPI et MCZI :

Le MCZI (figure 29) permet de donner une présentation de détection de la sécheresse comme le CZI et le SPI, pour la majorité des plaines le R^2 varie entre 0.75 et 0.99 où le R^2 le plus fort a été enregistré dans la plaine de Sidi Bel Abbes (0.99) et la valeur la plus faible a été enregistré dans la plaine de Ghriss (0.75). Le MCZI a montré des résultats médiocres dans la détection de la sécheresse par rapport à CZI et le SPI. Le remplacement de la précipitation la médiane à la moyenne des précipitations a provoqué des changements significatifs par rapport aux valeurs initiales CZI (Saeid Morid et al., 2006) en Iran.





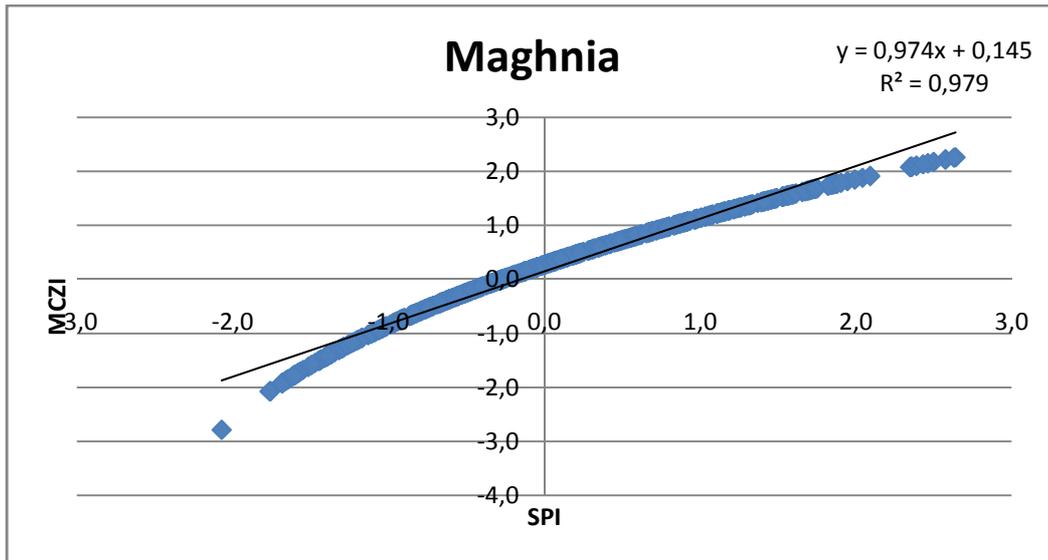


Figure 29: Relation entre le SPI et le MCZI pour les sept plaines de 1960 à 2010.

8) Pourcentage de l'indice normal. Percent of normal index (PNI):

Le pourcentage de l'indice normal est calculé en divisant les précipitations réelles par les précipitations normales, généralement considérée sur une période de 30 ans et en multipliant par 100%. Ceci peut être calculé pour une variété d'échelles de temps, y compris mensuelle, saisonnière, annuelle (Michael J. Hayes 2007).

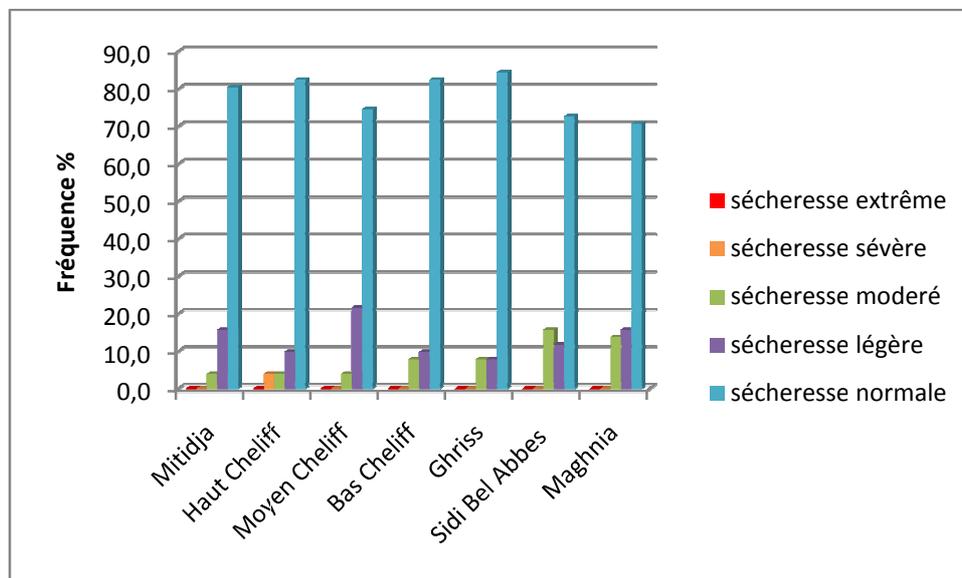


Figure 30 : fréquences des Pourcentage de l'indice normal pour les sept plaines

D'après la figure 30, le caractère 'sécheresse normale' est le caractère le plus dominant pour toutes les plaines. On observe aussi pour toutes les plaines que, les deux caractères 'sécheresse sévère' et 'sécheresse extrême' sont plus faibles

Selon le pourcentage de l'indice normal, la plupart des intensités de sécheresse sont concentrés dans la décennie de 90.

9) **Paramètres descriptifs des séquences de sécheresse :**

Il est important de caractériser le début et la fin d'une sécheresse (durée), ainsi que son intensité, et sa fréquence.

Fréquence des séquences de sécheresse

La fréquence cumulée (F) de sécheresse donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude. Pour obtenir la valeur de la Fréquence des séquences de sécheresse en faisant le rapport de l'effectif cumulé des séquences sèches à l'effectif total des années pluviométriques (**Soro et al., 2014**).

Durée maximale des séquences de sécheresse

La durée de la sécheresse est l'une des caractéristiques importante de la sécheresse. En effet si une sécheresse débute rapidement sous certains régimes climatiques, il faut généralement au moins deux à trois mois avant de s'installer dans d'autres régions. Elle peut ensuite persister pendant des mois voire des années. Le calcul de la durée se fait comme suit (**Soro et al., 2014**):

- analyser une série de données sur une longue période afin de déterminer la période la plus sèche ;
- faire la soustraction entre l'année où termine cette sécheresse avec l'année où elle débute ; le résultat obtenu est ajouté d'un.

$$(A_{\text{fin}} - A_{\text{début}}) + 1$$

A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ;

A_{début} : Année du début de la période sèche ;

Pour cette étude, la durée maximale sera considérée comme paramètre caractéristique de la durée des séquences sèches.

Intensité des séquences de sécheresse

L'intensité de la sécheresse peut être défini comme étant l'ampleur et la gravité des conséquences du déficit de précipitations. Elle peut être évaluée à l'aide des valeurs du SPI. Dans le cadre de cette étude, la valeur extrême du SPI a été considérée comme valeur de référence de l'intensité de la sécheresse (**Soro et al., 2014**).

L'analyse de **la durée** des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre (Tableau 18). A court terme et à long terme, les plaines de la Mitidja, Sidi

Bel Abbès, Ghriss et Maghnia ont connu la plus longue période de sécheresse avec 12 mois de séquences sèches consécutives. A moyen terme, c'est celle de Sidi Bel Abbès qui a connu la plus longue période de sécheresse avec 35 mois d'épisodes secs. Il est à noter que la durée maximale de sécheresse a été observée sur la Plaine de Moyenne Cheliff à long terme avec 67 mois.

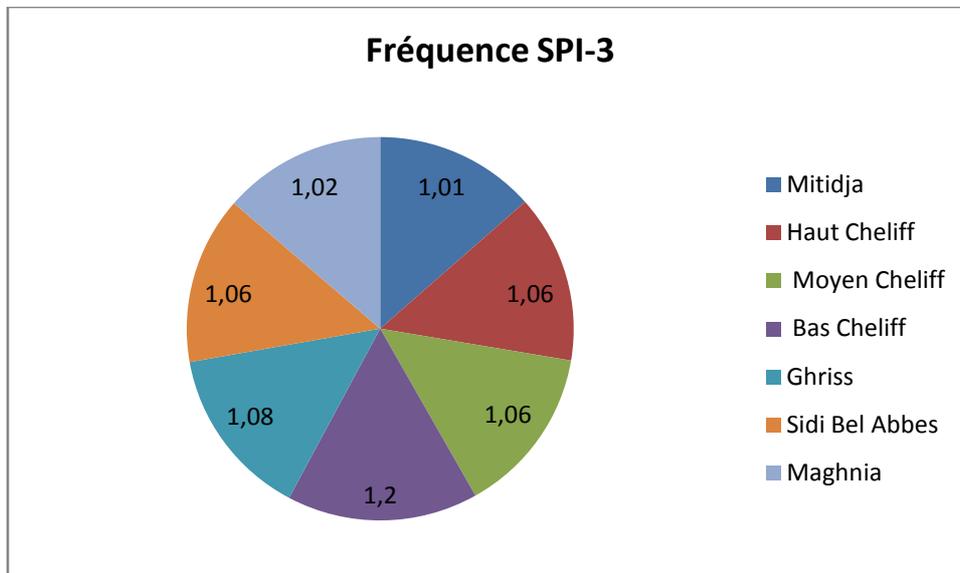
Au cours des 50 années analysées, les sécheresses les plus remarquables de par leur *intensité* ont été observées sur la plaine de Sidi Bel Abbès (Tableau 18). Les épisodes secs détectés sur cette plaine ont été qualifiés d'extrêmement sévères en termes d'intensité

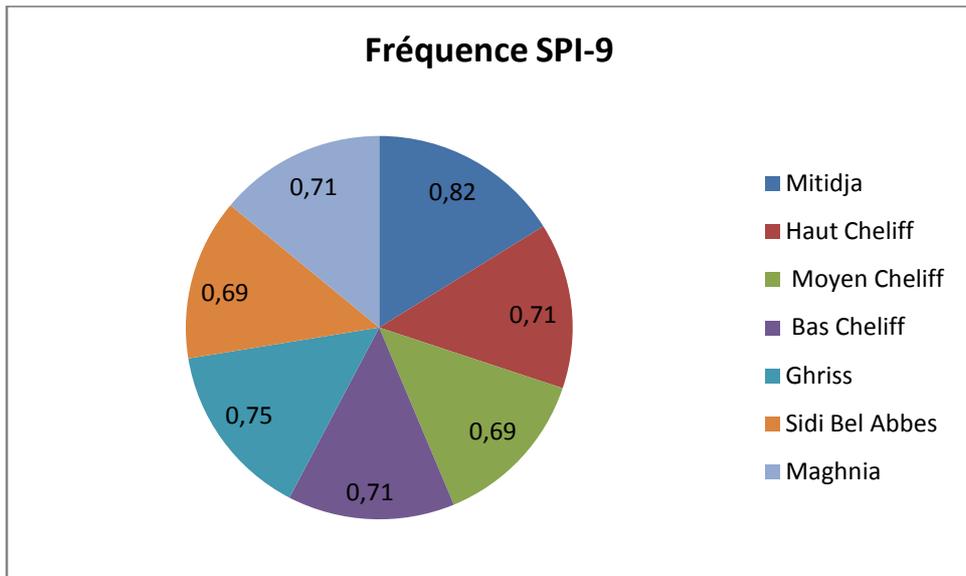
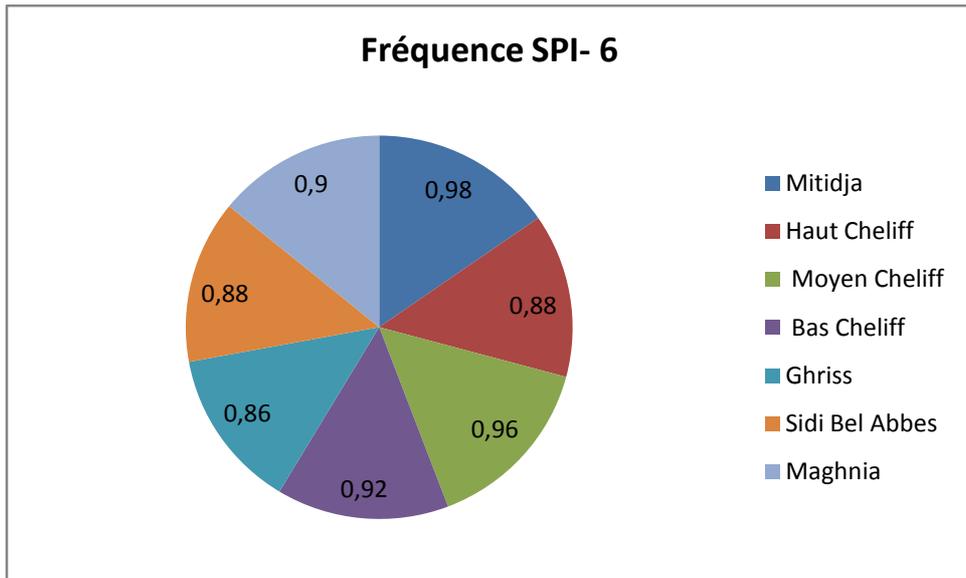
Tableau 18 : les caractéristiques descriptives de la sécheresse selon les SPIs à différentes échelles de temps pour les sept plaines.

<i>Plaine</i>	<i>SPIs</i>	<i>Durée maximal</i>	<i>Intensité</i>	<i>Fréquence</i>
Mitidja	SPI-3	12 mois	-1,4	1,01
	SPI-6	12 mois	-1,9	0,98
	SPI-9	21 mois	-2,4	0,82
	SPI-12	45 mois	-2,7	0,43
Haut Cheliff	SPI-3	11 mois	-1,4	1,06
	SPI-6	20 mois	-1,9	0,88
	SPI-9	28 mois	-2,5	0,71
	SPI-12	29 mois	-2,6	0,53
Moyen Cheliff	SPI-3	11 mois	-1,4	1,06
	SPI-6	11 mois	-1,9	0,96
	SPI-9	32 mois	-2,4	0,69
	SPI-12	67 mois	-2,5	0,45
Bas Cheliff	SPI-1	10 mois	-1,1	1,2
	SPI-3	10 mois	-1,5	1,04
	SPI-6	19 mois	-2	0,92
	SPI-9	32 mois	-2,4	0,71
Ghriss	SPI-12	58 mois	-2,2	0,45
	SPI-3	12 mois	-1,5	1,08
	SPI-6	23 mois	-1,9	0,86
	SPI-9	32 mois	-2	0,75
Sidi Bel Abbès	SPI-12	58 mois	-2	0,45
	SPI-3	12 mois	-1,4	1,06
	SPI-6	35 mois	-1,9	0,88
	SPI-9	46 mois	-2,6	0,69
Maghnia	SPI-12	62 mois	-2,9	0,43
	SPI-3	12 mois	-1,3	1,02

	SPI-6	23 mois	-1,7	0,9
	SPI-9	68 mois	-1,9	0,71
	SPI-12	60 mois	-2,1	0,37

L'analyse de la fréquence des épisodes de sécheresse observée dans l'extrême nord-ouest (figure 31) montre que , à court terme, la plaine de Ghriss semble la plus affectée par les séquences de sécheresse suivi des plaines de Haut et Moyen Cheliff et Sidi Bel Abbes avec des fréquences de 1.08 ,1.06, 1.06 et 1.06 respectivement. A moyen terme, la plaine de Moyen Cheliff semble la plus affectée par les épisodes secs avec une fréquence 0.96, à long terme c'est la plaine de Haut Cheliff avec une fréquence 0.53.





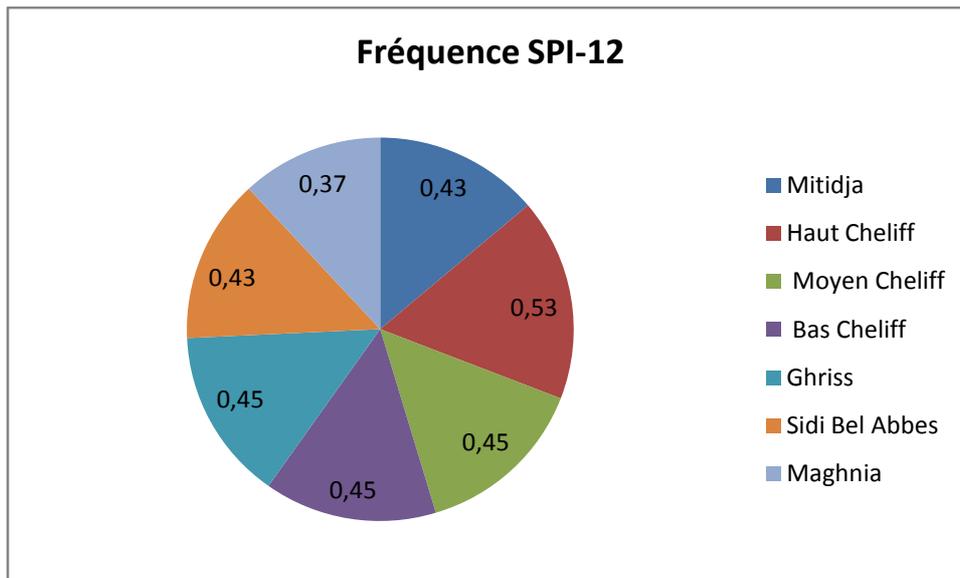


Figure 31: Fréquences des séquences de sécheresse durant la période 1960-2010 à court, moyen et long termes pour les seps plaines.

10) Conclusion :

L'étude des différents indices de la sécheresse avait pour but d'identifier et caractériser la sécheresse au niveau des sept plaines de la région d'étude durant la période 1960-2010.

L'analyse du SPI à différentes échelles de temps a mis en évidence la capacité de celui-ci à refléter la durée et l'intensité de la sécheresse pluviométrique. Les deux aspects les plus difficiles et les moins bien réussis dans ce domaine. Cette capacité le rend spécialement apte à caractériser les sécheresses à longue durée, étant dans ce sens-là bien adapté aux climats méditerranéens où les longues sécheresses sont les plus importantes à suivre et à contrôler. Selon cet indice, nous avons trouvé que la majorité des plaines étudiées ont été affectées par la sécheresse surtout durant la décennie 90 où le SPI correspond à une valeur négative. L'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse météorologique déterminée par l'indice de précipitation standardisé «SPI», à l'échelle de 3, 6, 9 et 12 mois durant la période 1960-2010 montre une tendance sèche évidente dans toute la zone d'étude en termes de sévérité et de durée augmentant d'Est en Ouest, surtout vers 1976 et 1981, ce qui indique que la persistance significative d'événements de sécheresse dans un proche avenir peut être persistante.

Selon le coefficient de Pearson, le SPI et le CZI ont une bonne relation dans la majorité des plaines, par contre le MCZI a montré des résultats médiocres dans la détection de la sécheresse.

D'après l'indice de DHI, les plaines du Moyen Cheliff et de Maghnia sont les plaines les plus menacées par le risque de la sécheresse.

Selon le pourcentage de l'indice normal, la plupart des intensités de sécheresse concentrée dans la décennie de 90.

Chapitre VI

**Etude de la persistance de la
sécheresse dans les sept plaines à
l'aide de la Chaîne de Markov**

1) **Introduction :**

Afin d'étudier la variation des précipitations aux échelles annuelle et saisonnière et étudié la persistance de la sécheresse au niveau des sept plaines pour la période d'étude (1960-2010), nous avons opté pour la méthode des chaînes de Markov d'ordre 1 et d'ordre 2 par l'utilisation de SPI à différentes échelles de temps qui permettent de déterminer la probabilité conditionnelle des années secs et humides

2) **Test de normalité:**

L'utilisation de la loi de probabilité permet d'estimer plus correctement les différents quintiles et terciles et de calculer leurs durées de retour (**Khalidi 2005**).

Dans cette partie, nous avons testé la normalité des séries pluviométriques annuelles à l'aide du logiciel Khronostat (**IRD 1998**) et les résultats sont affichés dans le tableau 19

La description détaillée de tous ces tests est aussi disponible dans le logiciel Khronostat utilisé (libre d'accès) conçu par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

Tableau 19: résultats des tests de normalités appliqués aux séries pluviométriques annuelles

<i>Plaine</i>	<i>Normalité</i>
Mitidja	oui
Haut cheliff	oui
Moyen cheliff	oui
Bas cheliff	oui
Ghris	oui
Sidi bel abbes	oui
Maghnia	oui

3) **Méthodes des quintiles :**

La méthode des quintiles tient compte de la loi de distribution de l'échantillon, et elle suppose aussi une période de retour égale à 2.5 ans pour une année sèche et 5ans pour une année très sèche. Afin de considérer un maximum d'information, et faire une analyse détaillée, nous avons également tenu compte d'une période commune s'étalant de 1960/1961 à 2009/2010 pour les sept plaines étudiées. Le tableau 20 donne les valeurs des seuils pluviométriques, en considérant les critères cités auparavant: T=5ans pour une année très sèche et T=2.5 ans pour une année sèche. Le seuil des années sèches et très sèches est plus proche pour les plaines moyennes et bas Chélif Ghriss, Sidi Bel Abbes et Maghnia, Pour les années normales la plage variée d'une station à une autre. En examinant le tableau 21 on

constate, une diminution du seuil des années humides et très humides en allant de la plaine de Mitidja vers les autres plaines qui sont situées à l'ouest.

Tableau 20 : Seuils des années sèches, très sèches, humides et très humides par la méthode des quintiles pour la période (1960-2010)

4) Application la chaîne des Markov d'ordre 1 et 2 en utilisant le SPI :

4.1) Application de la chaîne de Markov d'ordre 1:

Les résultats de l'application de l'hypothèse de processus de Markov ordre 1 par l'utilisation de l'indice de sécheresse SPI, nous trouvons comme suite:

<i>Nom de station</i>	<i>Années très sèches</i>	<i>Années sèches</i>	<i>Années normales</i>	<i>Années humides</i>	<i>Années très humides</i>
Mitidja	565	642,2	642,2<Xi<744	811,9	1082,3
Haut cheliff	346,4	395,1	395,1<Xi<440,4	491,3	651,6
Moyen cheliff	291,80	340,02	340,02<Xi<404,87	463,97	600,52
Bas cheliff	282,6	333,0	333,0<Xi<354,4	401,7	483,3
Ghris	258,7	297,2	297,2<Xi<320,6	359,8	548,6
Sidi bel abbes	258,1	328,5	328,5<Xi<366,9	410,0	561,7
Maghnia	222,9	256,5	256,5<Xi<315,6	366,9	501,3

4.1.a) A l'échelle annuelle (SPI 12 mois):

A la suite de l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 1, nous constatons comme suite :

Tableau 21 : Processus de Markov d'ordre 1 pour le SPI de 12 mois

<i>Plaine</i>	<i>S_S</i>	<i>S_NS</i>	<i>NS_S</i>	<i>NS_NS</i>
Mitidja	88.1	11.9	12.5	87.2
Haut cheliff	88.7	11.3	9.7	90.0
Moyen cheliff	87.5	12.5	12.5	87.2
Bas cheliff	89.7	10.3	10.0	89.6
Ghris	90.7	9.3	11.7	87.9
Sidi bel abbes	89.5	10.5	9.0	90.7
Maghnia	90.8	9.2	9.9	89.8

S_S (deux années sèches successives), S_NS (une année sèche suivie d'une année non sécheresse), NS_S (une année non sèche suivie d'une année sèche), NS_NS (deux années successives non sèches)

- L'application des chaînes de Markov d'ordre 1 a montré que la probabilité d'avoir deux années sèches successives est très élevée au niveau des sept plaines et varie entre (88.1 et 90.8 %), ce qui signifie, que toute la partie Nord-Ouest de l'Algérie a connu une sécheresse persistante. Si une année sèche, la probabilité pour qu'elle soit suivie d'une année non sèche est faible pour toutes les plaines. Pour l'ensemble des plaines, la probabilité d'avoir une année sèche après une année non sèche est faible (moins de 50%). Si une année est non sèche, la probabilité d'avoir une autre année non sèche l'année suivante elle sera plus élevée pour l'ensemble des plaines où elle sera comprise entre (87.2 et 90.7%).

4.1.b) A l'échelle saisonnière (SPI-3 mois) : on a aussi appliquée la chaîne de Markov d'ordre 1 à l'échelle saisonnière :

- **Automne:**

Pour la saison d'automne, l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 1, a donné les résultats suivants (Tableau 22) :

Tableau 22 : Processus de Markov d'ordre 1 - Automne

<i>Plaine</i>	S_S	S_NS	NS_S	NS_NS
Mitidja	48.1	51.9	56.5	39.1
Haut cheliff	53.6	46.4	59.1	36.4
Moyen cheliff	57.1	42.9	54.5	40.9
Bas cheliff	53.6	46.4	59.1	36.4
Ghris	71.4	28.6	36.4	59.1
Sidi bel abbes	63.0	37.0	43.5	52.2
Maghnia	60.0	40.0	36.0	60.0

- Pour avoir deux automnes secs successifs, la probabilité est forte pour l'ensemble des plaines (plus de 50%) sauf pour la plaine de Mitidja (48.1 %), cela est du à la position géographique de cette plaine où le climat est plus humide. Si un automne est sec au départ, la probabilité d'avoir un prochain automne non sec est faible pour toute les plaines (moins de 50%) sauf la plaine de Mitidja (51.9 %). La probabilité d'avoir un automne sec succédant un automne non sec est supérieur à

50 % pour les plaines de Mitidja, Haut, Moyen et Bas Cheliff par contre elle est inférieure de 50% dans les plaines Ghriss, Sidi Bel Abbes et Maghnia. La probabilité d'avoir un automne non sec après un automne non sec est moins de 50% pour les plaines de Mitidja, le Haut, Moyen et le Bas Cheliff par contre elle dépasse les 50 % dans les plaines de Ghriss, Sidi Bel Abbes et Maghnia .

5) Hiver :

Pour la saison **hiver**, l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 1, a donné les résultats consignés dans le tableau23:

Tableau 23 : Processus de Markov d'ordre 1-Hiver

<i>Plaine</i>	<i>S_S</i>	<i>S_NS</i>	<i>NS_S</i>	<i>NS_NS</i>
Mitidja	44.0	56.0	52.0	44.0
Haut cheliff	55.6	44.4	50.0	45.5
Moyen cheliff	56.0	44.0	41.7	58.3
Bas cheliff	50.0	50.0	44.0	56.0
Ghris	72.4	27.6	33.3	61.9
Sidi bel abbes	61.5	34.6	41.7	58.3
Maghnia	65.5	31.0	42.9	57.1

- Dans le cas où un hiver sec, la probabilité d'avoir un hiver suivant sec est forte pour l'ensemble des plaines avec un maximum au niveau de la plaine de Ghriss avec 72.4%, cette situation exige l'utilisation de l'irrigation pour les cultures pour palier à cette insuffisance, elle est faible uniquement dans la plaine de Mitidja (44%). Pour avoir un hiver non sec après un hiver sec, la probabilité est élevée uniquement dans la plaine de Mitidja et faible pour les autres plaines. La probabilité d'avoir un hiver sec succédant un hiver non sec est plus faible pour l'ensemble des plaines moins de 50 % à l'exception la plaine de la Mitidja (52.0%). La probabilité d'avoir deux hivers non secs successifs est importante pour la majorité des plaines sauf dans les plaines de Mitidja et du Haut Cheliff où la probabilité est faible (moins de 50%), ces deux dernies plaines sont caractérisées par une pluviométrie relativement élevée.

6) Printemps :

Pour la saison printemps, l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 1, a donné les résultats consignés dans le tableau 24 :

Tableau 24 : Processus de Markov d'ordre 1-Printemps

<i>Plaine</i>	<i>S_S</i>	<i>S_NS</i>	<i>NS_S</i>	<i>NS_NS</i>
Mitidja	59.3	40.7	47.8	47.8
Haut cheliff	64.0	32.0	37.5	66.7
Moyen cheliff	70.8	29.2	28.0	72.0
Bas cheliff	42.9	57.1	37.9	58.6
Ghris	72.4	27.6	33.3	61.9
Sidi bel abbes	66.7	33.3	24.1	72.4
Maghnia	72.0	28.0	28.0	68.0

- Dans le cas où un printemps sec, la probabilité d'avoir un printemps suivant sec est élevée pour l'ensemble des plaines avec la probabilité la plus élevée enregistrée dans la plaine de Ghriss (72.4%). Cette dernière a été touchée par une réduction importante de la pluviométrie dès 1975 (Meddi et Meddi, 2009). Pour avoir un printemps non sec après un printemps sec la probabilité est faible pour l'ensemble des plaines sauf une légère augmentation observée dans les plaines du Bas Cheliff (57.1%). Pour l'ensemble des plaines. La probabilité d'avoir un printemps sec succédant un printemps non sec est faible pour l'ensemble des plaines avec une probabilité minimum dans la plaine de Sidi Bel Abbes (24.1%). La probabilité d'avoir deux printemps non sec successifs est très importante (supérieur à 50%) pour toutes les plaines à l'exception de la plaine de Mitidja (47.8%), ce qui montre que cette plaine est plus touchée par les pluies que les autres plaines.

4.2) Application de la chaîne de Markov d'ordre 2 :

A la suite de l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 2, nous constatons comme suite :

4.2-a) A l'échelle annuelle (SPI 12 mois):

Pour chaque plaine on a calculé la matrice de Markov d'ordre 2 qui sont représentés dans le Tableau 26 :

Tableau 26 : Processus de Markov d'ordre 2 pour SPI 12 mois

<i>Plains</i>	<i>S_S_S</i>	<i>S_S_NS</i>	<i>NS_S_S</i>	<i>NS_S_NS</i>
Mitidja	90.5	9.5	69.4	30.6
Haut cheliff	88.3	11.7	85.7	14.3
Moyen cheliff	90.2	9.8	67.6	32.4
Bas cheliff	91.1	8.9	76.7	23.3
Ghris	92.1	7.9	77.4	22.6
Sidi bel abbes	91.1	8.9	75.9	24.1
Maghnia	92.7	7.3	71.4	28.6

- Si deux années successives sont sèches, la probabilité d'avoir une troisième année sèche est très importante pour la totalité des plaines (plus de 50%) dont la probabilité la plus élevée observée dans la plaine de Maghnia (92.7%), où le phénomène de la sécheresse est beaucoup plus persistant dans cette plaine. La probabilité d'avoir deux années successives sèches suivies d'une année non sèche est faible pour l'ensemble des plaines (moins de 50 %) avec une probabilité très faible dans la plaine Maghnia (7.3%). Si une séquence se compose d'une année non sèche et d'une année sèche, la probabilité d'avoir l'année suivante une année sèche est importante pour toutes les plaines qui atteignent une valeur maximum dans la plaine de Haut Cheliff (85.7%). La probabilité d'avoir une année sèche isolée au milieu de deux années non sèches est faible pour la totalité des plaines où la plaine de Haut Cheliff a la probabilité la moins faible (14.3%).

4.2-b) A l'échelle saisonnière SPI -3 mois:

On a aussi appliquée la chaîne de Markov d'ordre 2 à l'échelle saisonnière :

- **Automne :**

Pour la saison d'automne, l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 2, a donné les résultats consignés dans le tableau 27 :

Tableau 27: Processus de Markov d'ordre 2-Automne

<i>Plaine</i>	<i>S_S_S</i>	<i>S_S_NS</i>	<i>NS_S_S</i>	<i>NS_S_NS</i>
Mitidja	46.2	53.8	53.8	46.2
Haut cheliff	73.3	26.7	30.8	69.2
Moyen cheliff	81.3	18.8	25.0	75.0
Bas cheliff	53.3	46.7	53.8	46.2
Ghris	65.0	35.0	87.5	12.5
Sidi bel abbes	76.5	23.5	40.0	60.0
Maghnia	66.7	33.3	55.6	44.4

- La probabilité d'avoir trois automnes secs est grande pour l'ensemble des plaines dont la probabilité la plus forte atteint une valeur de (81.3%) dans la plaine de Moyen Cheliff sauf la plaine de Mitidja qui a une probabilité faible (46.2%). La probabilité d'avoir deux automnes successifs secs suivis d'un automne non sec est faible pour la totalité de plaines dépasse les (50%), sauf la plaine de Mitidja qui atteint une probabilité plus de (50 %). Si une séquence se compose d'un automne non sec et d'un automne sec, la probabilité d'avoir l'automne suivant un automne sec est faible dans les plaines de Haut et Moyen ainsi la plaine de Sidi Bel Abbes, elle est élevée dans les plaines de Mitidja, Bas Cheilif, Ghriss et Maghnia dont la plus grande probabilité dans la plaine de Ghriss (87.5%). La probabilité d'avoir un automne sec isolé au milieu de deux automnes non secs est importante dans les plaines de haut Cheliff, Bas Cheliff et Sidi Bel Abbes et faible dans les plaines de Mitidja, Ghriss et Magnia avec une probabilité très faible dans la plaine de Ghriss (12 ,5 %).

- **Hiver :**

Pour la saison d'Hiver , l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 2, a donné les résultats consignés dans le tableau 28 :

Tableau 28 : Processus de Markov d'ordre 2-Hiver

<i>Plaine</i>	<i>S_S_S</i>	<i>S_S_NS</i>	<i>NS_S_S</i>	<i>NS_S_NS</i>
Mitidja	41.7	36.4	30.8	69.2
Haut cheliff	66.7	33.3	45.5	54.5
Moyen cheliff	64.3	35.7	50.0	50.0
Bas cheliff	63.6	58.3	63.6	36.4
Ghris	71.4	28.6	71.4	28.6
Sidi bel abbes	87.5	12.5	20.0	70.0
Maghnia	68.4	31.6	66.7	22.2

- La probabilité d'avoir trois hivers secs est élevée pour la totalité des plaines, à l'exception la plaine de Mitidja qui enregistré une probabilité faible (41.7%). La probabilité d'avoir deux hivers successifs secs suivis un d'hiver non sec est très faible pour l'ensemble des plaines sauf pour la plaine de Bas Cheliff qui a une probabilité de (58.3%). Si une séquence se compose d'un hiver non sec et d'un hiver sec, la probabilité d'avoir l'hiver suivant un hiver sec est moins importante dans les plaines de Mitidja et Haut Cheliff et elle est très faible dans la plaine de Sidi bel Abbes (20%) par contre, elle est forte pour les autres plaines. La probabilité d'avoir un hiver sec isolé au milieu de deux hivers non secs est importante pour les plaines de Mitidja, le Haut Cheliff et Sidi Bel Abbes et elle est faible pour les autres plaines avec une probabilité très faible dans la plaine de Maghnia (22.2%) à l'extrême Ouest du pays où la réduction des pluies était très importante.*
- **Printemps :**
Pour la saison du Printemps, l'application de l'hypothèse d'un processus de Markov d'ordre 2, a donné les résultats consignés dans le tableau 29:

Tableau 29 : Processus de Markov d'ordre 2 -Printemps

<i>Plaine</i>	<i>S_S_S</i>	<i>S_S_NS</i>	<i>NS_S_S</i>	<i>NS_S_NS</i>
Mitidja	56.3	43.8	63.6	36.4
Haut cheliff	75.0	25.0	44.4	44.4
Moyen cheliff	70.6	29.4	71.4	28.6
Bas cheliff	44.4	55.6	45.5	54.5
Ghris	71.4	28.6	85.7	14.3
Sidi bel abbes	64.3	35.7	71.4	28.6
Maghnia	77.8	22.2	57.1	42.9

- La probabilité d'avoir trois printemps secs est importante dans toutes les plaines avec une probabilité maximum dans la plaine de Maghnia (77.8%), par contre la plaine de bas Cheliff qui a enregistré une probabilité faible (44.4%). La probabilité d'avoir deux printemps successifs secs suivis un d'un printemps non sec est très faible pour la totalité des plaines sauf la plaine de Bas Cheliff où la probabilité plus moins forte (55.6 %). Si une séquence se compose d'un printemps non sec et d'un printemps sec, la probabilité d'avoir le printemps suivant sec est faible pour les plaines de Haut et Bas Cheliff par contre elle est faible pour les autres plaines. Pour avoir un printemps sec isolé au milieu de deux printemps non secs, la probabilité est moins importante pour l'ensemble des plaines avec des probabilités plus faible dans les plaines du Moyen et de Sidi Bel Abbes (28.6%) et elle est, dans la plaine du Bas Cheliff, de l'ordre de 54.5%.

5) Conclusion :

Les chaînes de Markov ont l'avantage de permettre une modélisation explicite des données.

La matrice de transition de la chaîne de Markov est généralement obtenue à partir des données historiques. Nous pouvons donc constater que la chaîne de Markov peut autant être utilisée dans un contexte de probabilité historique (réaliste) que dans un contexte plus théorique. Par ailleurs, une « explosion » combinatoire du nombre d'états susceptible d'être occupés par le système dont on souhaite de modéliser le comportement peut rendre difficile l'u

tilisation des modèles markoviens. Ceci présente un inconvénient dans l'utilisation de processus de Markov.

L'application de la chaîne de Markov dans la zone d'étude a montré que la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent d'une année, deux années de suite, voire trois années ou plus. Selon les séries de SPI, la probabilité d'avoir deux et trois années sèches consécutives est plus importante dans les plaines de Ouest occidentale, régions qui participent d'une façon considérable à la production agricole. Ces résultats pourront aider à établir une stratégie de lutte contre la sécheresse.

Chapitre VII

**Application du réseau de neurone
artificiel pour la prédiction de la
sécheresse dans les sept plaines**

1) Introduction :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles mathématiques non linéaires de type «boîte noire». Leur principe est basé sur la manière d'apprentissage du réseau de neurones biologiques dont ils tirent leur nom (**El Badaoui et al., 2013**). En pratique, cette approche est utilisée pour définir une relation déterminante entre les variables des processus et la priori connu sur le physique et la nature des -processus générés (ASCE 2000). Ceci est particulièrement utile aux fins de la prévision de la sécheresse, où le phénomène est stochastique et peu compris des variables qui peuvent le provoquer (**Govindaraju 2000**). Le réseau forward feed- multicouche perceptron (MLP) a été utilisé pour prévoir le SPI à deux mois de délai à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois). Ce type est le réseau neuronal artificiel le plus simple et le plus couramment utilisé dans les variables des ressources en eau et les domaines hydrologiques (**Mishra et Desai 2005**). De plus, la plupart des études ont montré que MLP peut mieux performer que les approches conventionnelles dans la modélisation et la prévision de séries temporelles non-linéaires et non-stationnaires (**Belayneh et Adamowski 2012, Kim et Valdés 2003a, Mishra et Desai 2005**). Dans notre cas, un réseau de feed-forward MLP deux à trois couches (couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie) est utilisé pour les prévisions SPI de sécheresse. Le MLP calcule une sortie unique telle que le SPI prévu jusqu'à deux mois à l'avance. Celui-ci dépend du nombre de SPI antérieurs dans le temps (t_n) reçus par la première couche en tant que variables d'entrée (n est le nombre de décalage temporel en mois il varie entre 1 mois et 12 mois) et le nombre de nœuds dans chaque couche cachée (N) (**Kim et Valdés 2003a**).

2) Principe :

La sortie SPI (t) est obtenue en formant une combinaison linéaire entre l'entrée (SPI antérieurs dans le temps ($t-n$) et leurs valeurs de pondération W_{ij} . Le calcul du résultat de couche cachée sortie via une fonction d'activation non linéaire. Après cela, la même opération est répétée pour le neurone de sortie. Ces deux processus sont explicitement donnés dans l'équation (50).

$$\hat{y}_k = \varphi_o \left[\sum_{j=1}^m w_{jk} * \varphi_h \left(\sum_{i=1}^n x_i * w_{ij} + b_{j_o} \right) + b_{k_o} \right] \dots \dots \dots (50)$$

Tel que φ_h et φ_o sont respectivement les fonctions d'activation du neurone caché et du neurone de sortie; w_{ij} et w_{jk} sont le vecteur de poids reliant les neurones entre la couche d'entrée «i» et la couche cachée «j» et entre la couche cachée «j» et la couche de sortie «k» respectivement, b_{j_o} et b_{k_o} sont le biais pour le neurone caché j^{th} et k^{th} neurone sortie respectivement, et n et m sont le nombre de neurones dans la couche d'entrée et la couche cachée, respectivement. La forme la plus communément utilisée de $\varphi(\cdot)$ dans (1) est la fonction sigmoïde, donnée comme:

$$\varphi(t) = \frac{1}{1+e^{-t}} \dots \dots \dots (51)$$

3) Préparation des données d'entrée et de sortie :

Afin de prévoir le SPI $i(t)$ à pas de temps de deux mois à l'avance ($i = 3, 6, 9$ et 12 mois), diverses combinaisons d'antécédents de SPI ($t-n$) peuvent être utilisées comme un modèle d'entrée. Chacune des séries SPI a été normalisée et centrée afin d'éviter tout effet de saturation susceptible d'être provoqué par l'utilisation de la fonction sigmoïde, avant d'être divisée en deux ensembles (**Mishra et Desai, 2005**). Des données d'apprentissage d'environ 70% (de 1960 à 1996) sont utilisées pour l'étalonnage du vecteur de poids (w_{jk}, w_{ij}) du RNA avec une sélection du nombre de neurones dans la couche cachée (N) et de la fonction d'activation. Le RNA est ensuite évalué sur des données de validation indépendantes (de 1997 à 2010).

Plusieurs modèles de RNA ont été conçus et examinés, en fonction de la variation du nombre d'entrées et de neurones dans la couche cachée (N) afin d'optimiser et d'affiner la non-linéarité existant entre les variables d'entrée et de sortie. Pour chaque série de SPI à différentes échelles de temps pour les sept plaines, neuf plans RNA ont été sélectionnés en fonction de la combinaison différente de variables de la série temporelle du SPI avant le temps ($t-2$). Les neuf conceptions RNA sont construites sous la forme du tableau 31. Nous illustrons dans la figure 32, la schématisation des données d'entrée et de sortie permettant de prévoir SPI-3 avec un délai de traitement de 2 mois avec 3 entrées et 3 neurones dans une couche cachée (3-3- 1 architecture RNA).

Tableau 31. Structures des modèles de prévision de la sécheresse.

Numéro de plan	Structure d'entrée	Sortie
1	SPI (t).	SPI (t+2)
2	SPI (t), SPI (t-1).	SPI (t+2)
3	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2).	SPI (t+2)
4	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3).	SPI (t+2)
5	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3), SPI (t-4).	SPI (t+2)
6	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3), SPI (t-4), SPI (t-5).	SPI (t+2)
7	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3), SPI (t-4), SPI (t-5), SPI (t-6).	SPI (t+2)
8	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3), SPI (t-4), SPI (t-5), SPI (t-6), SPI (t-7)	SPI (t+2)
9	SPI (t), SPI (t-1), SPI (t-2), SPI (t-3), SPI (t-4), SPI (t-5), SPI (t-6), SPI (t-7), SPI (t-8)	SPI (t+2)

Pour déterminer les combinaisons d'entrées optimales devant être incluses dans le modèle et le nombre de neurones (N) dans la couche cachée, une procédure d'essais et d'erreurs est utilisée (**Choi et al., 2008; Hirose et al., 1991; Mishra et Desai, 2006; Sheela et Deepa, 2013; Trenn, 2008; Zeroual et al., 2016**) au cours des phases d'étalonnage et de test du modèle RNA. Les nœuds dans la couche cachée permettent également de prendre en compte la présence d'éléments non stationnaires dans la série, telles que les tendances et les variations saisonnières (**Maier et Dandy, 1996**). Les deux fonctions d'activation utilisées sont les suivantes: fonction sigmoïde dans la couche cachée et une fonction linéaire dans la couche

de sortie. Des études antérieures ont montré que les deux fonctions permettent d'approcher la relation non linéaire existante entre les SPI (**Bari Abarghouei et al., 2011**).

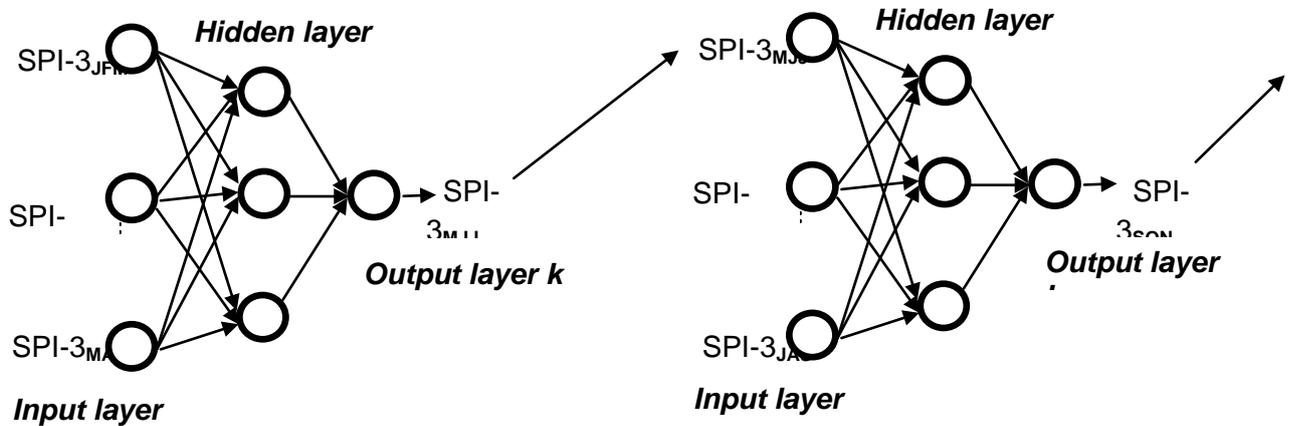


Figure 32 : Schématisation des données d'entrée et de sortie avec un délai de 2 mois avec une architecture 3-3-1 RNA (exemple de SPI 3 mois) (SPI-3JFM est l'indice de précipitation normalisé à 3 mois des mois de janvier, février et mars)

Après la construction des neuf conceptions ANN présentées dans le tableau 31, l'algorithme de Levenberg–Marquardt (LM) back-propagation (BP) est utilisé pour l'étalonnage du réseau à rétroaction MLP.

4) Critères de performance du modèle

Une fois le décalage adopté, la collecte de données pour la validation a été fournie au réseau. Cette fois, seuls les vecteurs d'entrée ont été transmis au modèle. Les performances des modèles sont évaluées à l'aide de plusieurs indicateurs, comme le coefficient de détermination ajusté (R_{adj}^2), erreur de racine carrée (RMSE) et erreur moyenne absolue (MAE) entre les SPI observés et les SPI prévus par le modèle RNA.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SPI_{i(obs)} - SPI_{i(sim)})^2}{\sum_{i=1}^n (SPI_{i(obs)} - SPI_{(mean)})^2} \dots \dots \dots (52)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-p-1} \dots \dots \dots (53)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (SPI_{i(obs)} - SPI_{i(sim)})^2} \dots \dots \dots (54)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |(SPI_{i(obs)} - SPI_{i(sim)})| \dots \dots \dots (55)$$

Dans lesquelles $SPI_{i(obs)}$, $SPI_{i(sim)}$, $SPI_{i(mean)}$ représentent respectivement les indices normalisés de précipitations observés, prévus et moyens; n : le nombre total de données et p le nombre de coefficients de régression; R^2 : coefficient de détermination.

Un bon modèle devrait avoir un RMSE et un MAE inférieurs, ce qui indique de faibles erreurs accumulées (Chai et Draxler, 2014; Tian et al., 2018; Willmott et Matsuura, 2005) et proches de l'unité. Ce dernier a été suggéré pour juger de la qualité du modèle lorsque plusieurs variables d'entrée sont utilisées. Le R^2 ajusté pénalise l'ajout de variables qui n'améliorent pas le modèle (Tian et al., 2018).

5) Résultats :

Après la sélection des variables d'entrée et de sortie dans chacune des sept (07) plaines, nous examinons les neuf (09) conceptions du RNA indiquées dans le tableau 32 pour trouver le meilleur modèle capable de capturer la non-linéarité et la non-stationnarité dans les séries du SPI pour prédire SPI (t) de 2 mois en avance. Pour ce faire, la fonction d'activation sigmoïde a été considérée comme la fonction de transfert. Lors de l'apprentissage d'un modèle à trois couches, les coefficients de connexion (poids) entre les différentes couches sont calculés de telle manière que les sorties du modèle soient aussi proches que possible des sorties désirées.

Le but de l'optimisation en phase d'apprentissage est de minimiser l'erreur entre les productions prédites et observées en modifiant itérativement les matrices de poids W et les vecteurs de polarisation en fonction du gradient de coût: le gradient est estimé par une méthode spécifique au réseau neuronal: propagation arrière (BP) d'erreurs par l'utilisation de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM). Pour chaque modèle testé, le nombre de neurones (N) est compris entre 2 et 25, et ensuite l'optimum a été trouvé en utilisant les méthodes d'essai et d'erreur.

Les résultats de la meilleure conception du RNA en termes de performances statistiques (R^2_{adj} , RMSE and MAE) à chaque niveau et à différentes échelles de temps sont présentés dans le tableau 32. En considérant les résultats de l'étalonnage, on peut constater que la meilleure conception RNA a été trouvée, varie d'une plaine à une autre et d'une échelle à l'autre.. Dans toutes les plaines et à différentes échelles de temps, le nombre de neurones cachés (N) a

été trouvé conformément aux lois $2n$ et $2n + 1$. Ces résultats ont été préconisés par Tang et **Fishwick (1993)**, **Wong (1991)** et **Lippmann (1987)** dans le cas d'un réseau de neurones à multicouches perceptrons où "n" est le nombre d'entrées.

Comme le montre le tableau 33, les valeurs RMSE et MAE pour la phase de validation du meilleur plan RNA varient de 0,22 à 0,41 et de 0,12 à 0,23, respectivement. La valeur la plus basse de RMSE concernait la plaine de GHRISS à l'échelle de 12 mois et la plus élevée pour les plaines de Bas Cheliff et du GHRIS à une échelle de 3 mois. tandis que les valeurs du coefficient de détermination ajusté (R_{adj}^2) obtenues au cours de la phase de validation vont de 0,81 à 0,94.

Initialement, pour le SPI3 (tableau 33) avec 5 entrées et 9 neurones dans la couche cachée, les résultats ont montré que R_{adj}^2 de la plaine de Maghnia est le plus élevé comparé à ceux d'autres plaines, avec un R_{adj}^2 égal à 0,93, une valeur de RMSE de 0,22. et MAE égal à 0,159.

Le R_{adj}^2 pour la plaine de Maghnia est également la valeur la plus élevée (0,93) pour le SPI9 avec 6 entrées et 12 neurones dans la couche cachée, et les valeurs du RMSE et du MAE sont respectivement de 0,21 et 0,145 (Cf. tableau 32). Cependant, pour le SPI6, le haut Cheliff avec 5 entrées et 12 neurones dans la couche cachée et la plaine de Sidi Bel-Abbés, 6 entrées et 9 neurones dans la couche cachée ont montré de meilleurs résultats avec des valeurs de R_{adj}^2 égales à 0,89 et des valeurs RMSE égales à 0,29 et à 0,31 respectivement. Enfin, pour SPI12, (Cf. tableau 32), les valeurs les plus élevées du R_{adj}^2 , RMSE et MAE égales à 0,943, 0,23 et 0,142, respectivement, ont été enregistrées pour la plaine de Bas Cheliff avec 8 entrées et 15 neurones dans la couche cachée.

En outre, nous notons que, en comparant les performances des modèles RNA à toutes les échelles de temps, la valeur la plus élevée du R_{adj}^2 et la valeur la plus basse de RMSE et de MAE ont été trouvées pour SPI12. Le bon accord entre les SPI observés dans les plaines et ceux prédits par RNA à différentes échelles de temps peut être déduit à l'aide du graphique en boîte illustré à la figure 33. L'accord sur une période de 12 mois entre les valeurs de SPI observées et les valeurs prévues par RNA apparaît clairement également dans la figure 34. Le même accord a été trouvé à des échéances de 3, 6 et 9 mois. Ceci est présenté dans les figures 5, 6 et 7 (Annexe).

Ce qui précède montre clairement la capacité puissante des RNA en ce qui concerne la prévision de la sécheresse pour un pas du temps de deux mois, malgré la forte variabilité spatiale et temporelle du SPI dans cette zone située dans le climat de transition entre les zones arides (au sud) et méditerranéennes (au nord). Cette variabilité a été capturée dans la modélisation par l'utilisation de différentes conceptions et structures du réseau de neurones. Ainsi, les modèles mentionnés et leur structure peuvent être utilisés pour la planification et la gestion des ressources en eau. Son utilisation est également recommandée pour les régions voisines caractérisées par une disponibilité très limitée des ressources en eau.

Tableau 32 : Mesures statistiques sur la performance de l'ANN pour un délai de deux mois dans les sept plaines à différentes échelles de temps.

<i>Plaines</i>	<i>Echelle de temps</i>	<i>Architecture du réseau</i>	R^2_{adj}	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>
Mitidja	SPI 3	3-08-1	0.862	0.38	0.2218
High Cheliff		4-08-1	0.849	0.39	0.2233
Middle Chelif		4-09-1	0.885	0.35	0.1999
Low Cheliff		3-07-1	0.850	0.41	0.2303
Ghriss		5-10-1	0.827	0.41	0.2345
Sidi Bel Abbès		3-06-1	0.878	0.33	0.1965
Maghnia		5-09-1	0.934	0.22	0.1593
Mitidja	SPI 6	4-08-1	0.868	0.35	0.1737
High Cheliff		5-12-1	0.896	0.29	0.1886
Middle Chelif		5-11-1	0.862	0.35	0.2044
Low Cheliff		5-10-1	0.874	0.34	0.2152
Ghriss		6-13-1	0.850	0.32	0.2091
Sidi Bel Abbès		6-09-1	0.895	0.31	0.2187
Maghnia		5-10-1	0.849	0.34	0.2171
Mitidja	SPI 9	4-09-1	0.818	0.37	0.1661
High Cheliff		5-10-1	0.824	0.37	0.1772
Middle Chelif		5-11-1	0.892	0.30	0.169
Low Cheliff		5-12-1	0.901	0.30	0.1682
Ghriss		7-13-1	0.868	0.28	0.1647
Sidi Bel Abbès		6-13-1	0.888	0.30	0.1462
Maghnia		6-12-1	0.934	0.21	0.1453
Mitidja	SPI 12	4-08-1	0.848	0.26	0.1297
High Cheliff		6-13-1	0.908	0.23	0.1373
Middle Chelif		7-12-1	0.926	0.23	0.1520
Low Cheliff		8-15-1	0.940	0.23	0.1425
Ghriss		7-14-1	0.894	0.21	0.1404
Sidi Bel Abbès		3-06-1	0.923	0.24	0.1549
Maghnia		4-08-1	0.904	0.25	0.1711

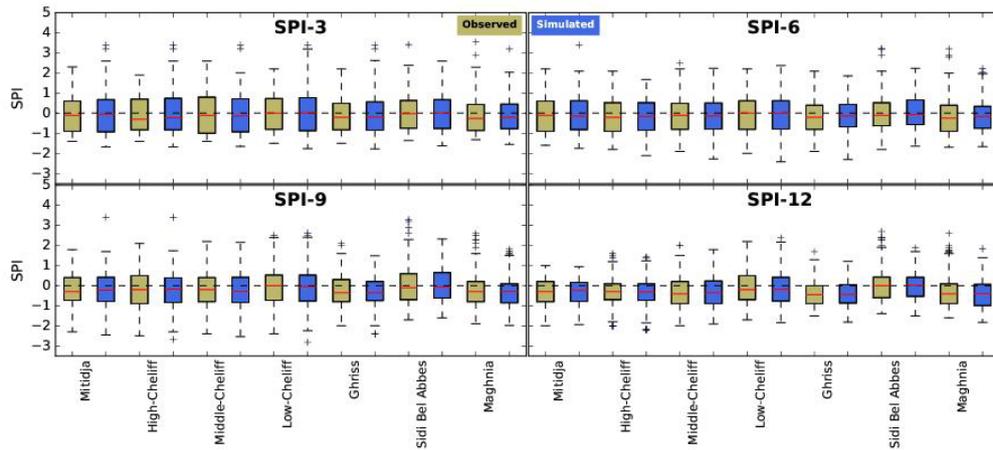


Figure 33 : Cartographie des valeurs de SPI observées et prédites pour les sept plaines étudiées (1960-2010) pour le SPI à différentes échelles de temps (ligne de couleur rouge: médiane, boîte: premier et troisième quartiles, moustaches: intervalle de confiance à 99%, + marqueur: valeur aberrante).

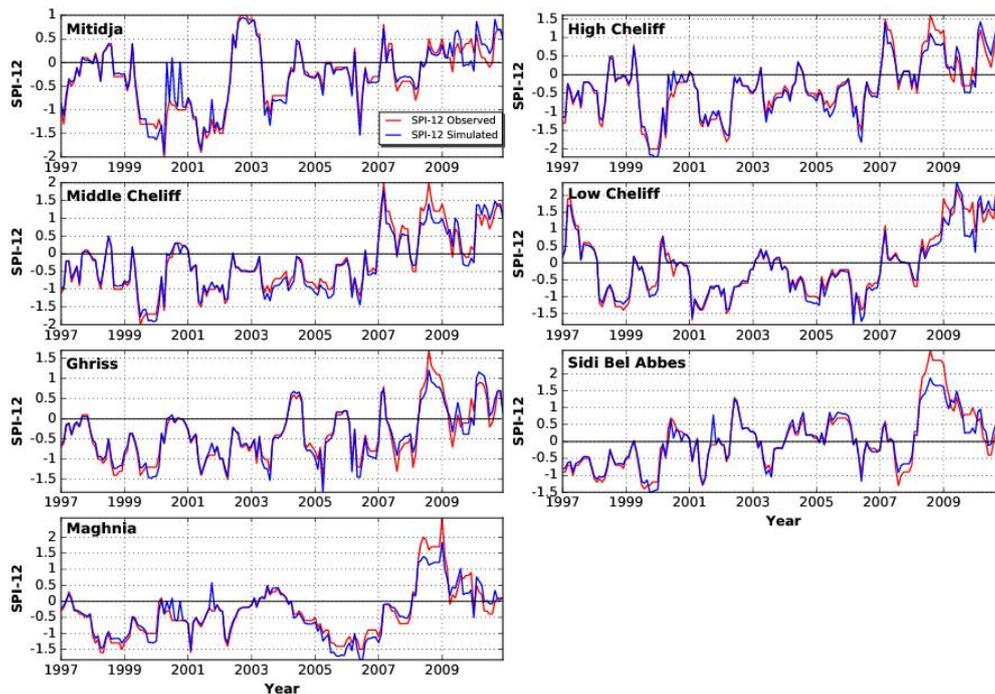


Figure 34: Comparaison des SPI 12 observés et prévus au cours de la phase de validation pour les sept plaines étudiées.

6) **Discussion:**

Les séries chronologiques des SPI étant autorégressives d'ordre 1, nous avons opté pour la prédiction à partir de 2 mois. De plus, le choix de prédiction par des réseaux de

neurones artificiels dépend de la capacité de prévision de cette technique dans les cas de séries chronologiques non stationnaires (Allende et al. 2002).

Les modèles de réseaux de neurones de différentes conceptions donnent des résultats satisfaisants malgré la série chronologique non stationnaire des SPI. Ainsi, les modèles mentionnés peuvent être utilisés pour la planification et la gestion des ressources en eau afin d'ajuster deux mois plus tôt la demande des activités agricoles en fonction de la répartition géographique de la sécheresse. Deux mois à venir seront suffisants tant que les mois de pluies seront de novembre à mars, dans cette région et la demande agricole se situe au printemps (avril à juin).

Par conséquent, nous estimons que deux mois plus tard, il est insuffisant de développer un système d'alerte de sécheresse dans les sept plaines sur la base d'informations météorologiques pour une meilleure gestion des processus d'irrigation, par évaluation SPI3 et ressources en eau, par SPI6, SPI9 et SPI12, respectivement. Les résultats obtenus pour la prévision constituent un outil d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau et en particulier pour l'irrigation dans les plaines étudiées.

7) **Conclusion** :

Un modèle à trois couches (couche d'entrée, couche cachée et couche de sortie) a été utilisé pour prédire la sécheresse deux mois en avance en utilisant la série du SPI à différentes échelles de temps (3-, 6-, 9-, 12- mois). La meilleure performance des modèles RNA pour la prévision de la sécheresse a été acquise en se basant sur l'analyse de RMSE et du R^2 . Les résultats indiquent que les modèles RNA ont fourni de bons résultats de prédiction et que la meilleure conception du modèle RNA a été étudiée avec différentes combinaisons d'intrants et a été validée par rapport aux sept plaines étudiées. Par conséquent, la meilleure conception des réseaux de propagation de Levenberg-Marquardt a été trouvée différente d'une plaine à l'autre et selon les échelles de temps. Ces résultats seront utiles pour le développement agricole et la gestion des ressources en eau et pour développer un système précis d'alerte à la sécheresse basé sur des informations météorologiques sur la sécheresse. L'utilisation du modèle est recommandée pour les régions voisines avec une disponibilité très limitée des ressources en eau.

Conclusion générale

◆ Conclusion générale :

Dans la région nord-occidentale de l'Algérie, le phénomène de la sécheresse ne constitue pas en fait un événement exceptionnel, mais un phénomène fréquent qui a toujours pesé sur l'homme et son environnement, et, il est par conséquent un facteur important pour toute étude socio-économique, de planification.

Les sept plaines du nord-ouest de l'Algérie sont connues pour leur fertilité et leur importante contribution à l'autosuffisance du pays en termes de production alimentaire. Au cours des dernières décennies, les niveaux élevés du déficit pluviométrique et les effets néfastes de la sécheresse sur l'approvisionnement en eau et l'agriculture ont déjà été vécus dans cette zone. Par conséquent, la fréquence des sécheresses accentuera encore le déséquilibre local entre l'offre et la demande des ressources en eau. Ainsi, l'étude des approches de la variabilité de la sécheresse météorologique et de la prévision de la sécheresse est nécessaire pour une gestion plus durable des ressources en eau dans le contexte de la surveillance de la sécheresse.

L'étude de la sécheresse au niveau de sept plaines de Nord-Ouest Algérien a permis de tirer les conclusions et recommandations suivantes :

L'analyse du SPI à différentes échelles de temps, met en évidence la capacité de celui-ci à refléter la durée et l'intensité de la sécheresse pluviométrique, les deux aspects les plus difficiles et les moins bien réussis dans ce domaine. Cette capacité le rend spécialement apte à caractériser les sécheresses à longue durée, étant dans ce sens-là bien adapté aux climats méditerranéens où les longues sécheresses sont les plus importantes à suivre et à contrôler. Selon cet indice, nous avons trouvé que la majorité des plaines étudiées ont été affectées par la sécheresse surtout durant la décennie 90 où le SPI correspond à une valeur négative.

L'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse météorologique déterminée par l'indice de précipitation standardisé «SPI», à l'échelle de 3, 6, 9 et 12 mois durant la période 1960-2010, montre une tendance sèche évidente dans toute la zone d'étude en termes de sévérité et de durée augmentant d'Est en Ouest, surtout vers 1976 et 1981, ce qui indique que la persistance significative d'événements de sécheresse dans un proche avenir peut être persistante.

L'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse météorologique déterminée par l'indice de précipitation standardisé «SPI» et leurs caractéristiques, à savoir la

sévérité et la durée, à l'échelle de 3, 6, 9 et 12 mois 1960-2010. Les résultats ont montré une tendance sèche évidente dans toute la zone d'étude en termes de sévérité et de durée qui augmente d'Est en Ouest, surtout entre 1976 et 1981,

L'application des chaînes de Markov a montré que la sécheresse est un phénomène assez fréquent et récurrent pour une année, deux années de suite, voire trois années consécutives. Selon les séries du SPI, la probabilité d'avoir deux et trois années sèches consécutives est plus importante dans les plaines de l'Ouest occidentale, régions qui participent d'une façon considérable à la production agricole. Ces résultats pourront aider à établir une stratégie de lutte contre la sécheresse.

La prévision de sécheresse par le RNA dans la région d'étude pour un pas de temps de deux mois, l'architecture des réseaux de perceptrons multicouches avec l'algorithme de calibration de Levenberg-Marquardt ont été utilisés donne des résultats satisfaisants avec un coefficient de détermination ajusté (R_{adj}^2) supérieur à 0,81, un RMSE et l'erreur absolue moyenne (MAE) inférieure à 0.41 et 0.23 respectivement. Par conséquent, le modèle de prévision de la sécheresse proposé par RNA peut être facilement adopté pour établir, deux mois à l'avance, des calendriers d'irrigation adéquats en cas de stress hydrique et pour optimiser la production agricole.

Puisque la sécheresse est un phénomène stochastique, deux approches ont été utilisées, les chaînes de MARKOV et les réseaux neurone artificiel (RNA) pour but de ressortir la similitude entre les deux méthodes, ainsi de trouver le meilleur modèle de la prévision de la sécheresse au niveau des sept plaines étudiées par l'utilisation de SPI à différentes échelles de temps. Le premier a permis d'effectuer des prévisions de sécheresse pour les années futures. Le RNA a permis de produire un outil de prévision de la sécheresse deux mois à l'avance.

La méthode de calcul dans les deux approches différentes l'une par rapport à l'autre, puisque le modèle de la chaîne de MARKOV basée sur la probabilité d'occurrence des années sèches et humides mais, le RNA basé sur les variables d'entrée, à chacune de ces entrées est associée un poids w ainsi que sur des fonctions d'activation, en plus on peut trouver plusieurs types de RNA.

Les deux modèles donnent des résultats qui sont utiles pour le développement agricole et la gestion des ressources en eau ainsi que pour développer un système précis d'alerte à la sécheresse basée sur des informations météorologiques. Aussi, l'utilisation de ce modèle est recommandée pour les régions avec une disponibilité très limitée des ressources en eau.

Références bibliographiques

Références

- Abdelkader Khaldi (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. Université d'Oran .Algérie .239 pages.
- Abdallahhaghrab (2005) : etude de la sécheresse au MAROC (livre).Edition s Le Manuscrit, 2005. ISBN :2-7481-4648.
- Abenavoli, M. R., Leone, M., Sunseri, F., Bacchi, M., and Sorgonà, A. (2016). "Root Phenotyping For Drought Tolerance in Bean Landraces From Calabria (Italy)." *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(1), 1–12.
- Abramowitz, M., and Stegun, I. A. (1964). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. *National Bureau of Standards - Applied Mathematics Series*.
- Afouda et P. Adisso (1997). ' Etude stochastique des structures de séquences sèches au Bénin'. *IAHS Publ* ,240, 1997.
- Ait Mouhoub.D and Katteb , A. (2002) 'l'eau objet de toutes les convoitises. Colloque international sur l'eau. Chlef, 05/06/ Février, Algérie. (2002).
- Allende, H., Moraga, C., and Salas, R. (2002). "Artificial neural networks in time series forecasting: A comparative analysis." *Kybernetika*, 38(6), 685–707.
- Amar I et., al (2011). 'Les « marchés » de l'eau et de la terre dans la plaine de la Mitidja en Algérie : opportunités et fragilités' ; hal-00623466, version 1-19 sep 2011.
- Amani M., Kouassi, Koffi F. K, Yao. B. K,Kouakou B. D, Jean E. P et Sekouba. O (2010). 'Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire
- Ansoumana B.(2014). 'Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest).
- Ardoïn-Bardin S., (2004). ' Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eaude grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne'. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440p.
- Ardoïn. S. et al (2003). ' Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990' ; April 2003). *IAHSPubl.* no. 278. 2003.

- Assani A., (1999). 'Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña)'. *Sécheresse*, 10(4), pp 245- 252.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks. (2000). "Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts." *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115–123.
- Bari Abarghouei, H., Kousari, M. R., and Asadi Zarch, M. A. (2011). "Prediction of drought in dry lands through feedforward artificial neural network abilities." *Arabian Journal of Geosciences*, 6(5), 1417–1433.
- Barua, S., Ng, A. W. M., and Perera, B. J. C. (2012). "Artificial Neural Network–Based Drought Forecasting Using a Nonlinear Aggregated Drought Index." *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 17(12), 1408–1413.
- Bekkoussa, B., Meddi, M., and Jourde, H. (2008). "Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride □: cas de la plaine de Ghriess (Nord-Ouest algérien)." *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 19(3), 173–184.
- Beersma J. et Buishand A., (2004). 'Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, Water Resour. Res., 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- Brad C, Gianluca F , Irene A, Paolo P , Anne , Edoardo C. (2019). ' Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines'. Rapport sur les évolutions climatiques dans l'Espace Mont-Blanc.
- Benkrid. E .(2008). ' Etude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chélif (Algérie) ' mémoire de Master BGAE 2ème année Recherche Eau et Environnement (R2E) 200.
- CahAgric (2015). ' Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov. vol. 24, n8 3, mai-juin 2015.
- Habib B. et Fouaz R. (2013). ' Diagnostic écologique de la végétation et bioécologie de l'avifaune du Chott el Beida (wilaya de Sétif, hauts plateaux de l'est algérien). Université El Hadj Lakhdar - Batna-, Algerie - 2013
- Belayneh, A., and Adamowski, J. (2012). "Standard Precipitation Index Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Support Vector Regression." *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2012, 1–13.
- Bessai F.Z., Krelifaoui Mohamed, Guergab Mohamed centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique (CERIST) Division Base de Données et Système multimédia .

- Bergaoui M et Alouini A (2011). ‘Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie’. IRESA, revues Sécheresse. Volume 12, Numéro 4, 205-13, Décembre 2001.
- Benzarti Z. et Habaieb H., (2001) .’’ Etude de la persistance de la sècheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909- 1996)’’. *Sciences et changements planétaires, Sécheresse*. Vol 12 (4), 215-20.
- Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R., and Raghuwanshi, N. S. (2009). “Rainfall-Runoff Modeling: Comparison of Two Approaches with Different Data Requirements.” *Water Resources Management*, 24(1), 37–62.
- Blinda, M., Boufaroua, M., Carmi, N., Davy, T., Detoc, S., Froebrich, J., Gabina, D., Iglesias, A., Khalid, A., Khalifa, E., Margat, J., Moneo, M., and Tagar, Z. (2007). *Mediterranean Water Scarcity and Drought. Report. European Commission - Environment. Technical Report*.
- Brahim Habibi, Mohamed Meddi, Paul J.J.F. Torfs, Mohamed Remaoun, Henny A.J. Van Lanen (2018) : Caractérisation et prévision de la sécheresse météorologique à l'aide de modèles stochastiques dans le bassin semi-aride du bassin de Chélif - Zahrez (Algérie), *Journal of Hydrology: Regional Studies* 16 (2018) 15–3116
- Byun, H. R., and Kim, D. W. (2010). “Comparing the Effective Drought Index and the Standardized Precipitation Index.” *Options Méditerranéennes. Séries A. Mediterranean Seminars*, 89(95), 85–89.
- Carmelo et al (1993). ‘ Analyse par la chaîne de Markov de la sécheresse dans le Sud-est de l’Espagne’ ; *sécheresse 1993* ; 4 :123 :9 n° 2.vol. 4 juin 93
- Cancelliere, A., Mauro, G. Di, Bonaccorso, B., and Rossi, G. (2006). “Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index.” *Water Resources Management*, 21(5), 801–819.
- Carlos Alfonso et al (2006). ‘Analyse des déficits hydriques dans l’État de Chihuahua (Mexique)’ ; *Sécheresse 2006*; 17 (4) : 457-65.
- Cavadias Georges, (1994). ‘ Detection and Modelling of the impact of climatic change on river flows’. *Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands*, pp 207-218.
- Celso Augusto G. Santos et al (2009). ‘Drought forecast using an artificial neural network for three hydrological zones in San Francisco River basin, Brazil’ ; September 2009). *IAHS Publ.* 333, 2009.
- Chandramouli, C. V., Kaoukis, N., Karim, M., and Dorworth, L. (2017). “Uses of Precipitation-Based Climate Indices in Drought Characterization.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8), 5017013.

- Chaumont M et Paquin C, (1971). Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, échelle de 1/500 000, Société de l'histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, Alger.
- Chloé (2014). 'Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne. Géographie. Université Rennes 2, 2013. Français. NNT : 2013REN20025ff. tel-01059818.
- Sabbagh.C(2006). 'Une sécheresse et agriculture réduire de la vulnérabilité de l'agriculture a un risque accru de manque d'eau' ; Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Expertise scientifique collective Octobre 2006.
- Claude Touzet(1992). ' les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme cours, exercices et travaux pratiques.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., and Bobée, B. (2001). "Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations." *Water Resources Research*, 37(4), 885–896.
- Dabanl, İ., Mishra, A. K., and Şen, Z. (2017). "Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey." *Journal of Hydrology*, 552, 779
- Dai, A., Trenberth, K. E., and Qian, T. (2004). "A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming." *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117–1130.
- Dastorani. M.T et Afkhami. H (2011). 'Application of artificial neural networks on drought prediction in Yazd (Central Iran)'. *DESERT* 16 (2011) 39-48
- Demmak .A , Amara. A, Larbi.T ,Alili.D , Tambi. M. (1994). 'la sécheresse en Algérie des années 70/80. Journée nationale d'étude sur la sécheresse. Algérie 20 Juillet 1994.
- Demmak .A , Amara. A. (2001). 'la sécheresse en Algérie des années 70/80 et son impact sur les ressources en eaux'. Table ronde sécheresse- changement climatique- Désertification .Alger, le 12 Mars. (2001).
- Dingman, S. (1994). "Physical Hydrology Prentice Hall." *Inc., New Jersey*. Pages 785-792.
- Dreyfus, G., Martinez, J. M., Samuelides, M., Gordon, M. B., Badran, F., Thiria, S. & Herault, L. (2002) *Réseaux de neurones - Méthodologie et applications*. Livre.
- Edwards, D. C., and McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Colorado State University*.
- Ehsan Eyshirezaei et al .(2011). 'Comparative Analysis of Drought Indices for Drought Zone Scheme of Northern Khorasan Province of Iran'. ISSN 2067-3205; Electronic

2067-3264; Not SciBiol, 2011, 3(3):62-69.

- Estrela, T., and Vargas, E. (2012). “Drought Management Plans in the European Union. The Case of Spain.” *Water Resources Management*. DOI: 10.1007/s11269-011-9971-2.
- Faye, C., and DaoudaBa,D. (2019). ‘ Quantification de la sécheresse météorologique par des indices standardisés de précipitations dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017.revue de géographie de laboratoire Leidi ISSN 0851-2515 N^o 21 –Juillet 2019.
- François Anctil and Doha Guy Tape (2004). ‘An exploration of artificial neural network rainfall-runoff forecasting combined with wavelet decomposition1’.J. *Environ. Eng. Sci.* Vol. 3(Suppl. 1), 2004.
- Flores. A.J. (2011) : FOCUS ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. Copyright © 2011 by Nova Science Publishers, Inc.livre
- Gabriel, K. R., and Neumann, J. (1962). “A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88(375), 90–95.
- Gelman, A. & Rubin, D. B. (1992) ‘Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences’. *Stat. Sci.*7(4), 457–472. doi:10.1214/ss/1177011136.
- Gideon, S.(2009) :Application of Artificial Neural Networks in the Field of Geohydrology. Institute of Groundwater Studies Faculty of Natural- and Agricultural Sciences.Livre
- Govindaraju, R. S. (2000). “Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts.” *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 5(2), 115–123.
- Guttman, N. B. (1998). “Comparing the Palmer Drought Index and the Standardize Precipitation Index.” *Journal of the American Water Resources Association*, Blackwell Publishing Ltd, 34(1), 113–121.
- Hamed, K. H., and Ramachandra Rao, a. (1998). “A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data.” *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196.
- Haykin, S. (1994). “Neural networks-A comprehensive foundation.” *New York: IEEE Press.Herrmann, M., Bauer, H.-U., & Der, R.*ISBN: 978-0-02-352761-6. Pages: 768
- Hermès M. N. (2008). ‘Etude d'impact de la variabilité climatique sur la schistosomiase dans la zone de santé de Katana, Sud- Kivu en RDC. Université ouverte campus de Bukavu 2008.
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., and Pegion, P. (2012).

“On the increased frequency of mediterranean drought.” *Journal of Climate*, 25(6), 2146–2161.

- Hong Wu et al (2011). ‘An evaluation of the standardized precipitation index, the china-z index and the statistical z-score’. *Int. J. Climatol.* 21: 745–758 (2001).
- Hopfield, J. J. (1984). ‘Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons’. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **81**(10), 3088–3092. doi:10.1073/pnas.81.10.3088.
- Houndénou C. & Hernandez K., (1998) .‘Modification de la saison pluvieuse dans l’Atakora (1961-1990)’. Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sécheresse*, 9(1), pp 23-34.
- Hubert P., Carbonnel J.P., et Chaouche A., (1989). ‘Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest’. *Journal of Hydrology*, 1(10), pp 349-367.
- Jarraud M., (2006) . ‘changements climatiques et gestion des risques, conférence de presse’ Organisation météorologique mondiale (OMM), La Pastorale » Route de Ferney 106, Genève.
- Jianjin Wang, Peng Shi, Peng Jiang, Jianwei Hu, Simin Qu, Xingyu Chen, Yingbing Chen, Yunqiu Dai and Ziwei Xiao (2017). ‘Application of BP Neural Network Algorithm in Traditional Hydrological Model for Flood Forecasting’. *Water* 2017, 9(1), 48; <https://doi.org/10.3390/w9010048>
- Kadi D., (1995). ‘Contribution à l’étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation’. Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d’Alger.
- Kadous D., (2012). ‘Utilisation des réseaux de neurones comme outil de datamining’ : Génération de modèle comportemental d’un processus physique à partir de données. Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Measures. Charles Griffin: London; Kendall; M.G, P. 202.
- Khoualdia W., Mrad D., Djebbar Y., et Abida H., (2008) . ‘Cycle, Tendances ou Changement Climatique Analyse Statistique de la Pluviométrie de la Région de Souk-Ahras, Algérie’. 4^{ème} conférence internationale sur Les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Alger, Algérie, 22-23 Mars 2008.
- Khoualdia W., et Djebbar Y., (2010). ‘sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant Nord de la Medjerda, Algérie’. Colloque international CIEAU, 25-27 octobre 2010 Annaba.

- Khoualdia W., et Djebbar Y., (2011). 'Changement de la variabilité de pluie et concepts de modèles probabilistes pour la gestion des ressources hydriques du bassin versant d'oued Medjerda : Est Algérien'. Colloque international sur les ressources en eau et le développement durable CIREDD'4 : ENSH/22 et 23 février 2011 Alger. Communication sur
- Khoualdia W., et Djebbar Y., (2012). 'Contribution à l'étude de la sécheresse et son impact sur les ressources en eau de surface du bassin versant nord de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie)'. Colloque international «Géomatique et gestion des risques naturels»: 6-8 Mars 2012 université Oujda (Maroc).
- Khoualdia W., et Djebbar Y., (2013). 'Caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie)'. Colloque international «Hazards and Géomatics»: 17-20 Mai 2013 Hammamet - Tunisia.
- Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y., (2014) Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie'. *Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014)*.
- Kishan M., Chilukuri K., Sanjay R., (1996) 'Elements of Artificial Neural Networks', Neural networks (Computer science) I. Mohan, Chilukuri K. II. Ranka, Sanjay. II. Title. IV. Series. QA76.87.M45 1996 .
- Kim, T.-W., and Valdés, J. B. (2003a). "Nonlinear Model for Drought Forecasting Based on a Conjunction of Wavelet Transforms and Neural Networks." *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6), 319–328.
- Kim, T.-W., and Valdés, J. B. (2003b). "Nonlinear Model for Drought Forecasting Based on a Conjunction of Wavelet Transforms and Neural Networks." *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 8(6), 319–328.
- Kingumbi A., (2006). 'Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellig en Tunisie Centrale'. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.
- Kossida, M., and Mimikou, M. (2013). "A methodological framework for assessing drought hazard using operational indicators." Florida Melone Memorial Conf., CNR-IRPI, Perugia, Italy 2013.
- Koutsoyiannis, D. (2003). "Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics." *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 3–24.
- Koutsoyiannis, D., and Montanari, A. (2007). "Statistical analysis of hydroclimatic time series: Uncertainty and insights." *Water Resources Research*, 43(5).
- Kouame KF., (2011) : "Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle

hydrologique HYDROTEL,” Thèse d’Etat sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 p.

- Klajnmic Henri (2005) . ‘Estimation et comparaison de niveaux de retour pour les vitesses extrêmes des vents’. Revue modulad, 2005.
- Laborde J.P., Mouhous N. (1998) : Notice d’installation du logiciel HYDROLAB. Equipe de Gestion et Valorisation de l’Environnement. Université de NICE, Franc.
- Lahache RG., et Pillet G. (2008) ‘ Projection des ressources en eau de la Tunisie sous le effets des changements climatiques globaux’. XIIIth World Water Congress (Montpellier,2008), 12 p.
- Lazri M et al.(2006).‘Analyse de données de précipitations par approche markovienne’ .*Larhyss Journal, ISSN 1112-3680*, n° 06, Décembre 2007, pp. 7-20
- Lazri M et al (2007). ‘Etude de comportement de la pluie par imagerie radar ; 4th International Conférence: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 25-29, 2007 – Tunisia
- Le, J. A., El-Askary, H. M., Allali, M., and Struppa, D. C. (2017). “Application of recurrent neural networks for drought projections in California.” *Atmospheric Research*, 188, 100–106.
- Lek. S, Dimopoulos. I, Derraz. M et El Ghachtoul .Y (1996). ‘Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels . Revue des sciences de l'eau. Volume 9, numéro 3, 1996.
- Lloyd-Hughes B., et Saunders A. (2002).’ Seasonal prediction of European springprecipitation from El Niño-southern oscillation and local sea-surface temperatures, *International J. Climat.*, 22, 1–14.
- Lloyd-Hughes, B., and Saunders, M. A. (2002). “A drought climatology for Europe.” *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592.
- Lidia NAMANE .(2009) ‘Suivi des irrigations dans une exploitation agricole de la mitidja ouest commune de mouzaia’. Mémoire d’Ingénieur d’état en agronomie spécialité hydraulique-ENSA d'Elharrache Alger 2009.
- Lippmann, R. P. (1987). “An Introduction to Computing with Neural Nets.” *IEEE ASSP Magazine*, 4(2), 4–22.
- Lubes H., Gautier F., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E. (1998).’ Variabilité du régime pluviométrique de l’Afrique de l’Ouest non sahélienne entre 1950-1989’. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(6).
- Lubes H., Masson J-M., Paturel J-E., Servat E., 1998 : “Variabilités climatiques et statistiques. Etude par simulation de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l’homogénéité de chroniques,” Revue des Sciences de l’Eau, n°3, pp 383-

408,1998.

- Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F (1994) .? Caractérisation defluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques'. Etudebibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. OSTROM, Montpellier, France.
- Maccioni, P., Kossida, M., Brocca, L., and Moramarco, T. (2015). "Assessment of the Drought Hazard in the Tiber River Basin in Central Italy and a Comparison of New and Commonly Used Meteorological Indicators." *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(8), 5014029.
- Madadgar, S., and Moradkhani, H. (2013). "Drought Analysis under Climate Change Using Copula." *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(7), 746–759.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J., Wotling G., (2001). "Trends and discontinuities inregional rainfall of west and central Africa," *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226
- Maier, H. R., and Dandy, G. C. (1996). "The Use of Artificial Neural Networks for the Prediction of Water Quality Parameters." *Water Resources Research*, 32(4), 1013–1022.
- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric Tests Against Trend Author(s): Henry B. Mann Source:" *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- Mar, K. W., and Naing, T. T. (2008). "Optimum Neural Network Architecture for Precipitation Prediction of Myanmar." *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 2(12), 154–158.
- Mariotti, A. (2010). "Recent changes in the mediterranean water cycle: A pathway toward long-term regional hydroclimatic change?" *Journal of Climate*, 23(6), 1513–1525.
- Marcos,A. Freitas, S.et Max, h. Billib,A. (1997). 'Drought prediction and characteristic analysis in; Sustainabilityof Water Resources under Increasing Uncertainly (Proceedings of Rabat Symposium S1, april 1997). *IAHS Pubi.* no. 240, 1997.
- Marzban, C., and Stumpf, G. J. (1996). "A Neural Network for Tornado Prediction Based on Doppler Radar-Derived Attributes." *Journal of Applied Meteorology*, 35(5), 617–626.
- MasoudNasri (2010). 'Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Prediction Models in Risk Management; *World Applied Sciences Journal* 10(12): 1493-1500, 2010 ;ISSN 1818-4952.

- Matari A., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A. (1999) 'Sécheresse dans l'ouest algérien. *Publications de l'association internationale de climatologie*, volume 12, 1999.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Water*, 179(January), 17–22.
- McKee et al (1997) . 'Historical analysis of drought in the United States ; 2-7 february 1997
- Mebarki A., (2009). 'Ressources en eau et aménagement en Algérie, les bassins hydrographiques de l'Est'. *Office de publications universitaires.*, p.p 7- 32.
- Mebarki A.(2010). 'Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins'. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol 21, I 4. P. 3-10.
- Meddi, H., and Meddi, M. (2009). "Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie." *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20(1), 57–65.
- MeddiH&MeddiM(2009) : étude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaînes de Markov (1930-2003), *Courrier du Savoir – N°09*, Mars 2009, pp.39-48
- Meddi, M., Assani, A. A., and Meddi, H. (2010). "Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria." *Water Resources Management*, 24(14), 3817–3833.
- Meddi M., HuberT J. (2000). ' Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies'. 13ème colloque de l'Association Internationale de climatologie. 6 au septembre 2000 Nice, France.
- Meddi M., Hubert P., Bendjoudi H. (2002). ' Impact du changement du régime pluviométrique sur les ressources en eau dans le Nord-Ouest de l'Algérie'. *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*, 1-4 avril 2002, Montpellier, France.
- Meddi H et Meddi M (2009). ' Etude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaînes de markov (1930-2003)' *LRERP- Centre universitaire de KhemisMiliana, 44225 Algérie* : Mars 2009, pp.39-48.
- Medjerab, A., and Henia, L. (2005). "Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale/ Regionalisation of annual rainfall in the north-western parts of Algeria." *Revue Géographique de l'Est*, Association des Géographes de l'Est, 45(2).
- Medjerab, A., et Henia.L.(2011). ' variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie Nord-Occidentale 'n°11, mars 2011, pp.71-79.

- Michael J et Hayes (2007). 'Drought Indices; Climate Impacts Specialist, National Drought Mitigation Center', with Christina Alvord and Jessica Lowrey, WWA ; Feature Article From Intermountain West Climate Summary, July 2007.
- Mishra, A. K., and Desai, V. R. (2005). "Drought forecasting using stochastic models." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), 326–339.
- Mishra, A. K., and Desai, V. R. (2006). "Drought forecasting using feed-forward recursive neural network." *Ecological Modelling*, 198(1–2), 127–138.
- Morid, S ,vladimirsmakhtinb and mahnoshmoghaddasi. (2006). 'Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in iran', *Int. J. Climatol.* **26**: 971–985 (2006).
- NadjlaBentekhici, ; Yamina Benkesmia, ; Faouzi Berrichi et ;Sid Ahmed Bellal (2017). ' Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest algérien). revue Revue des sciences de l'eau ,Volume 31, Numéro 1, 2018, p. 43–59
- Nekkache GHENIM, A et MEGNOUNIF, A (2013). ' Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie)'. Volume 7 | 2013 : Varia 2013.
- Nicholson S-E., (1994). "Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship topast conditions over the continent," *The Holocene* 4,2 pp 121-131.
- Nohair, M., St-Hilaire, A. & Ouarda, T. B. (2008). 'Utilisation des réseaux de neurones et de la régularisation bayésienne en modélisation de la température de l'eau en rivière'. *Rev. des Sci. l'eau***21**(3), 373. Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE). doi:10.7202/018783ar.
- Obassi, G.O. (1994). 'WMO's Role in the International Decade for Natural DisasterReduction. Bulletin of AmericamMeteorological Society, 75-9, 655-1661.
- OSS (2013). 'Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb\ OSS. _ Collection Synthèse n° 4. _ OSS : Tunis, 2008. _ 84 pp. ISBN : 978-9973-856-39-5. _
- Opoku-Ankomah y. &Amisigo B.A. (1998). ' Rainfall and runoff variability in the southwestern river system of Ghana'. Proceedings of the Abidjan'98 conference on the WaterResources variability in Africa during the XXth Century. IAHS Publ. n° 252, pp 307-321.
- Ould Amara Arezki (2010) 'Analyse du phénomène à partir des données pluviométriques'.COMMUNICATION SUR LA SECHERESSE EN ALGERIE.ANRH.

- Ouis S. (2012). 'Impact des fluctuations climatiques sur la quantité et la qualité des eaux souterraines d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest Algérien) ; Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 11, Novembre 2012, pp. 119-131
- OMM (2012) :Organisation météorologique mondiale, 2012, Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. ISBN 978-92-63-21090-6.page 25.
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubes H., et Masson J.M., (1995). 'Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire', du Togo et du Bénin. Sécheresse, 6(1), pp 95-102.
- Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A. (2004). 'Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle'. *Sud Sciences and Technologies*. N°13, pp 40 – 46.
- Paturel J.E., Servat E., Delattre M., (1998) "Analyse des séries pluviométriques delongue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Journal des Sciences Hydrologiques," volume 43, n°3, pp. 937-945.
- Paulo, A., Martins, D., and Pereira, L. S. (2016). "Influence of Precipitation Changes on the SPI and Related Drought Severity. An Analysis Using Long-Term Data Series." *Water Resources Management*, 30(15), 5737–5757.
- Peñuelas, J., Lloret, F., and Montoya, R. (2001). "Severe drought effects on mediterranean woody flora in Spain." *Forest Science*, 47(2), 214–218.
- Parizeau, M. (2004) Réseaux de neurones. *Réseaux de neurones* 127. doi:10.1007/978-3-642-11764-0
- Pettitt, A. N. (1979). "A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem." *Applied Statistics*, 28, 126–135.
- Ramadan, H. H., Beighley, R. E., and Ramamurthy, A. S. (2013). "Temperature and Precipitation Trends in Lebanon's Largest River: The Litani Basin." *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, 139(1), 86–95.
- Rapport d'évaluation mondial sur la réduction des risques de catastrophe GAR 2011
- Raymond, F., Ullmann, A., and Camberlin, P. (2016). "Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen : quelles tendances entre 1950 et 2013 " *Cybergeo* □: *European Journal of Geography*.2016.
- Remini . b. (2011). 'La problématique de l'eau en Algérie du nord' ; *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 27-46.

- M. D., Ali, B., and Mahmood, K. (2013). “Assessment of drought hazard impact on wheat cultivation using standardized precipitation index in Iran.” *Arab J. Geosci.*, 6(11), 4463–4473.
- Robles M., López N., Gadsden H., Pineda R., Reyes-Gómez M. et Hinojosa R. (2006). ‘Analyse des déficits hydriques dans l’état de Chihuahua (Mexique)’. *Sècheresse*, 17(4), 457- 465.
- Salhi, C., Touaibia, B., and Zeroual, A. (2013). “Les réseaux de neurones et la régression multiple en prédiction de l’érosion spécifique: cas du bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam (Algérie).” *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1573–1580.
- Sari, A. (2002). *Initiation à l’hydrologie de surface*. Edition Distributiob HOUMA 2002 , Livre.
- Sarr, M (2008) . ‘variabilité pluviométrique en Afrique de l’Ouest : dynamique des espaces végétaux a partir des images satellitaires. Exemple du bassin versant du Ferlo (Senegal)’. *Journées de Climatologie – Nantes, 13-14 mars 2008 - Climat et société : Climat et végétation* 57.
- Schmit. A, Le Blanc.B,Corsini. B, Lafond. C and Bruzek.J.(2001). ‘Les réseaux de neurones artificielsUn outil de traitement de données prometteur pour l’anthropologie’. 13 (1-2) | 2001_2001(1-2).
- Safar-zitoun. M (2019).’ plan national secheressealgerie lignes directrices en vue de son operationnalisation’. Consultant CNULCD Alger, 30 Juin 2019
- Serinaldi, F., and Kilsby, C. G. (2016). “The importance of prewhitening in change point analysis under persistence.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(2), 763–777.
- Marieu B., (1999). ‘De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique del’Ouest et Centrale non sahélienne’. *Revue des sciences de l’eau*, 12(2), pp 363-387.
- Shiau, J. T. (2006). “Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas.” *Water Resources Management*, 20(5), 795–815.
- Shishutosh .B.(2010)‘DroughtAssessment and ForecastingUsing a NonlinearAggregatedDrought Index’ ; Thèse de doctorat d’Etat. Université Victoria .Australia .178 pages.
- Sircoulon J., (1987). ‘Variation des débits des cours d’eau et des niveaux des lacs enAfrique de l’ouest depuis le début du 20ème siècle’. *Proceedings of the VancouverSymposium on the Influence of Climatic Change and Climatic Variability on*

the Hydrologic Regime and Water Resources. IAHS Publ. n° 168, pp 13-25.

- Stooksbury D., Miskus D., et Stephens S., (2002) ‘The drought monitor, Bull. Amer.Meteor’. Soc., 83, 1181–1190.
- Stour. L et A. Agoumi (2008). ‘Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies’ .*Hydroécol. Appl. (2008) Tome 16*, pp. 215–232.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., and Vogt, J. (2014). “World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010.” *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792–2804.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., and Tignor, M. (2013). “IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel.”
- Storch, H. von, and Navarra, A. (1995). “Analysis of Climate Variability, 334 pp.”
- Soro. G, anouman. G., goula bi t.a.1, srohorou b., Savane i , (2014) ‘caractérisation des séquences de sécheresseMétéorologique a diverses échelles de temps enClimat de type soudanais : cas de l’extrêmes nord-ouestDe la cote d’ivoire’, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°18, Juin 2014, pp. 107-124
- Tang, Z., and Fishwick, P. a. (1993). “Feedforward Neural Nets as Models for Time Series Forecasting.” *INFORMS Journal on Computing*, 5(4), 374–385.
- Tekaya M. R. (2006). ‘Calcul d’un intervalle de confiance pour la moyenne dans une population asymétrique’. faculté des sciences et de génieuniversité Laval ’ Québec
- Thirumalaiah, K., and Deo, M. C. (1998). “River Stage Forecasting Using Artificial Neural Networks.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 26–32.
- Thirumalaiah, K., and Deo, M. C. (2000). “Hydrological Forecasting Using Neural Networks.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 180–189. Thom, H. C. S. (1958). “a Note on the Gamma Distribution.” *Monthly Weather Review*, 86(3), 117–122.
- Tokar, A. S., and Markus, M. (2000). “Precipitation-Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks and Conceptual Models.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 156–161.
- Tommy Klein (2009)comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l’aide d’indices climatiques BSG, 53, 2009, 75-86
- Torranin, P. (1973). “Unpredictability of hydrological drought.” *the Second International Symposium in Hydrology*, Fort Collins, Colo., Water Resources Publications, 1973., 595–604.

- Touzet C. (2016). ‘ les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme’ . cours, exercices et travaux pratiques. ec2, 1992, collection de l’erie, n. giambiasi. fhal-01338010f
- Trambly, Y., El Adlouni, S., and Servat, E. (2013). “Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries.” *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus GmbH, 13(12), 3235–3248.
- Tsopze N (2010). ‘Treillis de Galois et réseaux de neurones : une approche constructive d’architecture des réseaux de neurones’. PhD thesis, Université de Yaoundé I, 2010. 9, 13
- Vaillant J (1977). *Accroissement et gestion des ressources en eau*. Edition Eyrolles.Paris. P247
- Vandiepenbeeck M., 1998 : El Niño : l’enfant terrible du pacifique. Ciel et Terre,114(2), pp 52-56.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J. I. (2010). “A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index.” *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718
- Vissin E- W., 2007 : “Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des étatsde surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger,” Thèse de Doctorat.Hydroclimatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie - CNRS -UMR 5210. tel-00456097, version 1 - 11 Feb 2010. 285 p.
- Wang, S., Fu, Z., Chen, H., Nie, Y., and Wang, K. (2015). “Modeling daily reference ET in the karst area of northwest Guangxi (China) using gene expression programming (GEP) and artificial neural network (ANN).” *Theoretical and Applied Climatology*.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H., 1997: *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- Xoplaki, E., González-Rouco, J. F., Luterbacher, J., and Wanner, H. (2004). “Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends.” *Climate Dynamics*, 23(1).
- Yousra D, Ghalem Z, Rahal L, Hassan E. H(2016) 'Caractérisation De La Sécheresse Climatique Du Bassin Versant D’oum Er Rbia (Maroc) Par Le Biais De L’indice De Précipitation Standardisé (SPI)', *European Scientific Journal* May2016 edition vol.12,No.14ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- Yue, S., Pilon, P., and Cavadias, G. (2002). “Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series.” *Journal*

of hydrology, 259(1–4).

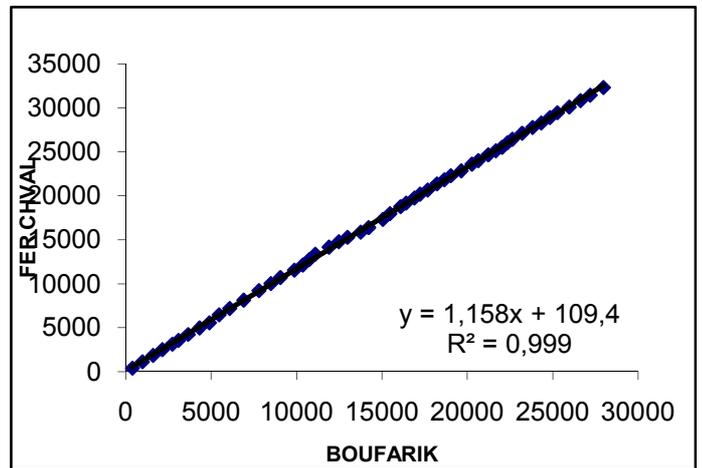
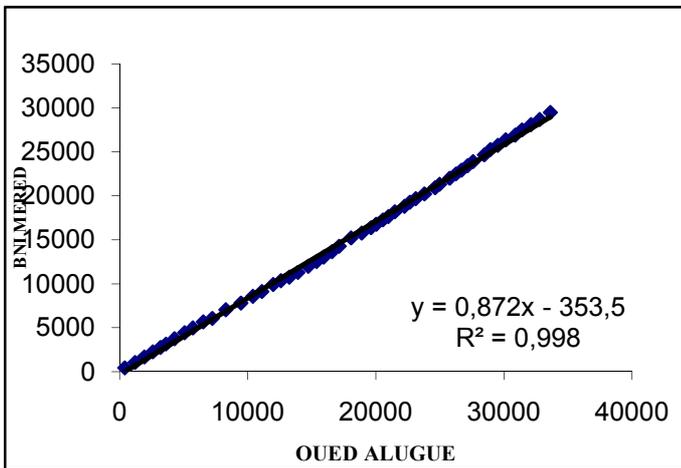
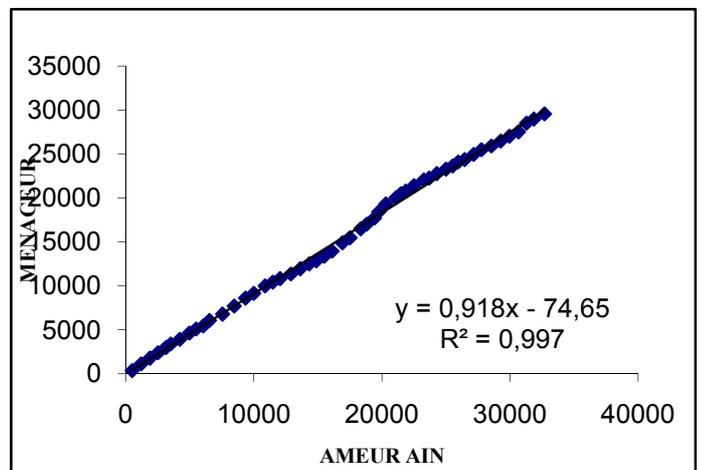
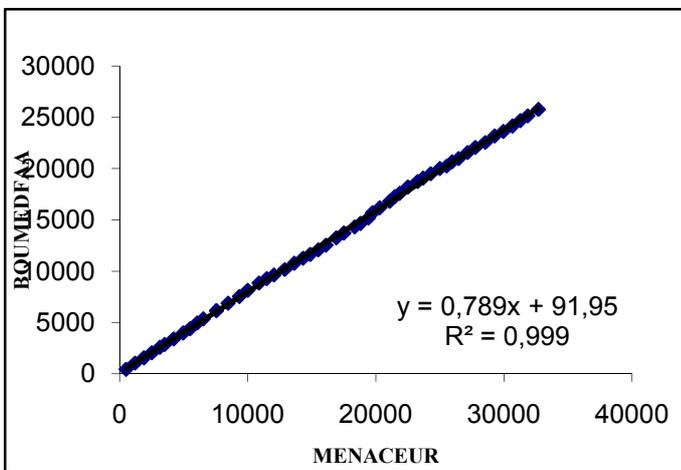
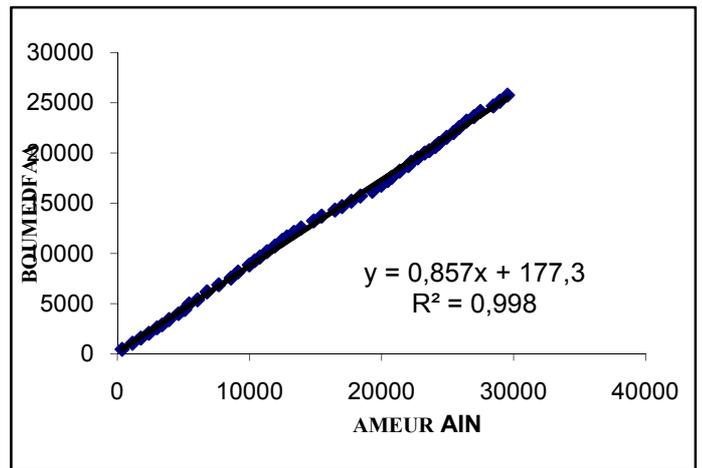
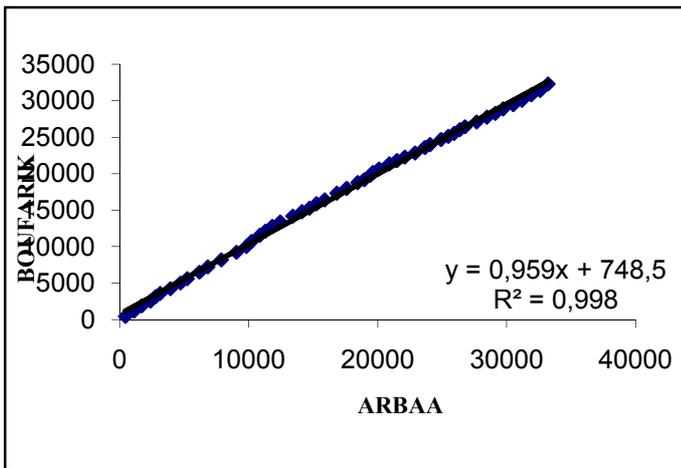
- Yue, S., and Wang, C. (2004). “The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series.” *Water Resources Management*, Kluwer Academic Publishers, 18(3), 201–218.
 - Benzarti. B. et Hamadi Habaieb ' .(2001)Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996) ; Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 12, Numéro 4, 215-20, Décembre 2001, Tunisie
 - Zeroual, A., Assani, A., and Meddi, M. (2017). “Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period.” *Hydrology Research*, 48(2), 584–595.
 - Zeroual, A., Meddi, M., and Assani, A. A. (2016). “Artificial Neural Network Rainfall-Discharge Model Assessment Under Rating Curve Uncertainty and Monthly Discharge Volume Predictions.” *Water Resources Management*, 30(9), 3191–3205.
 - Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., and Bai, Y. (2012). “SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China.” *Natural Hazards*, 64(1), 481–492.
- <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/supporting-topics/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/anderson-darling-and-distribution-fit/>

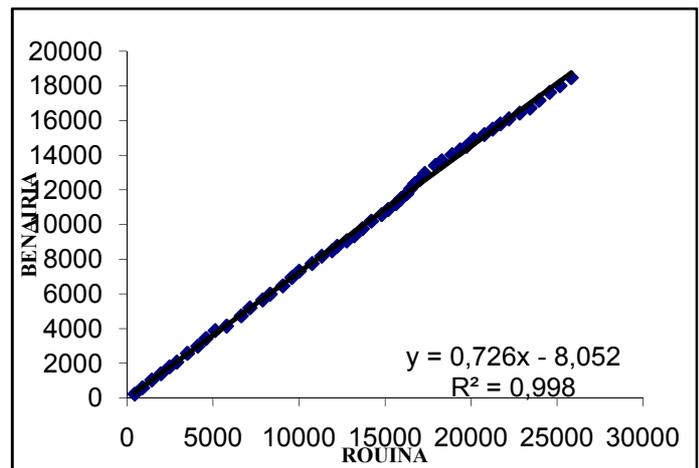
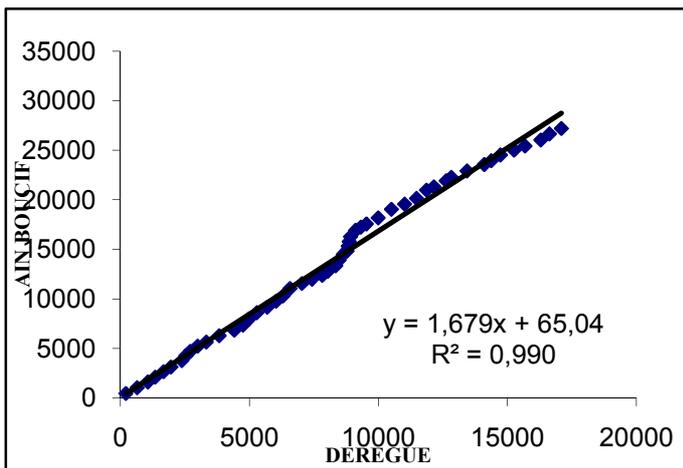
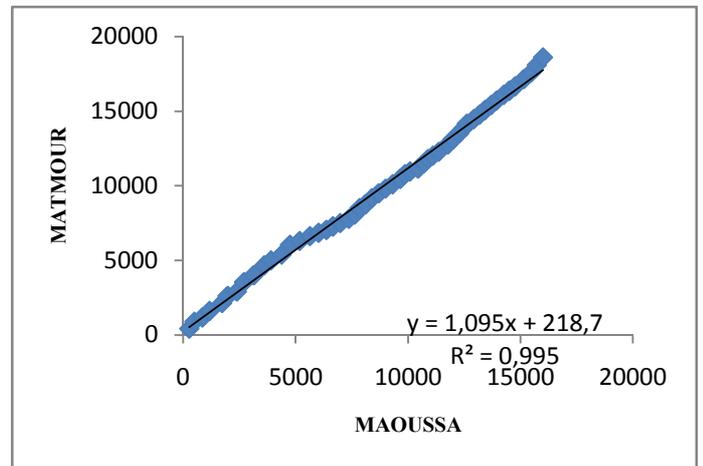
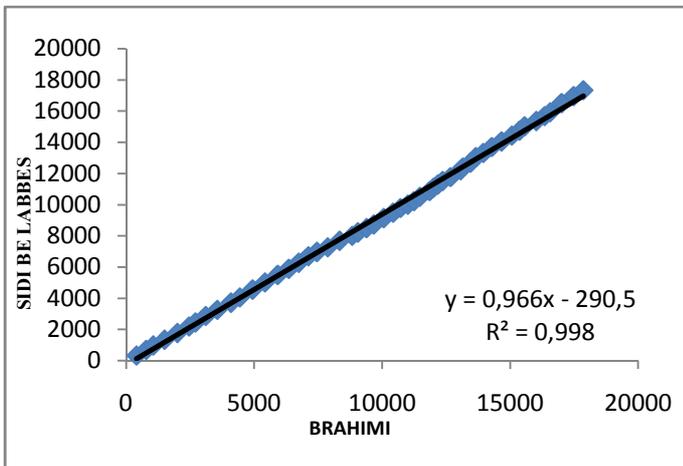
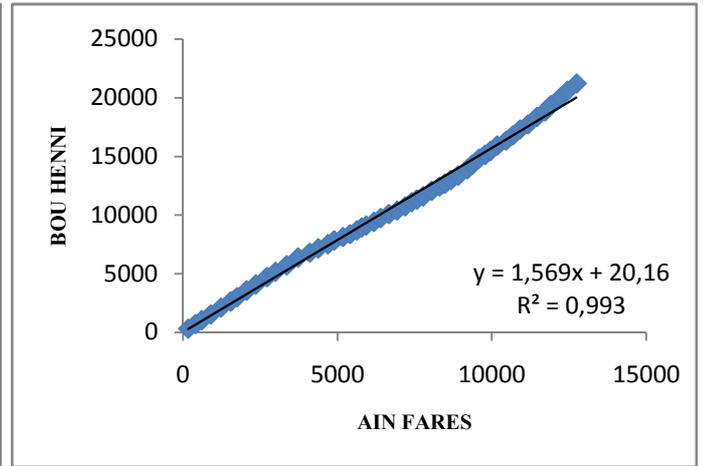
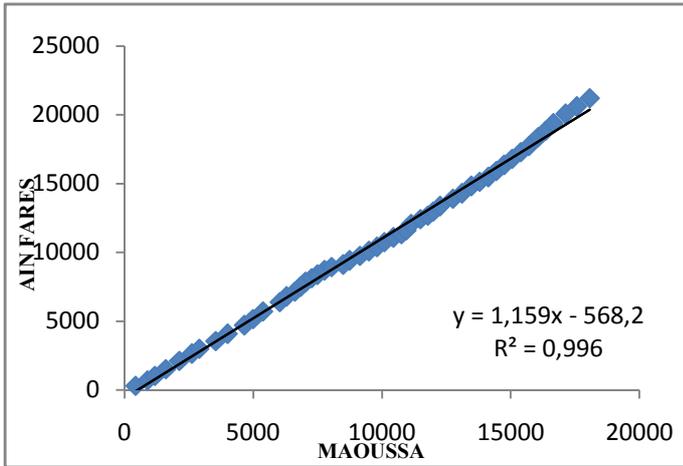
ANEXXE

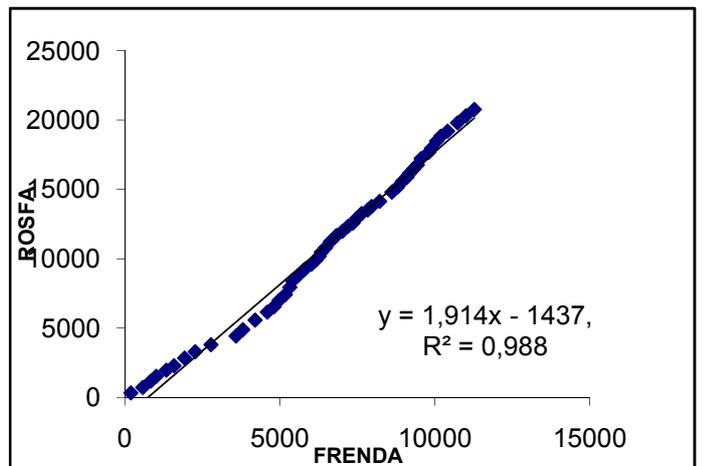
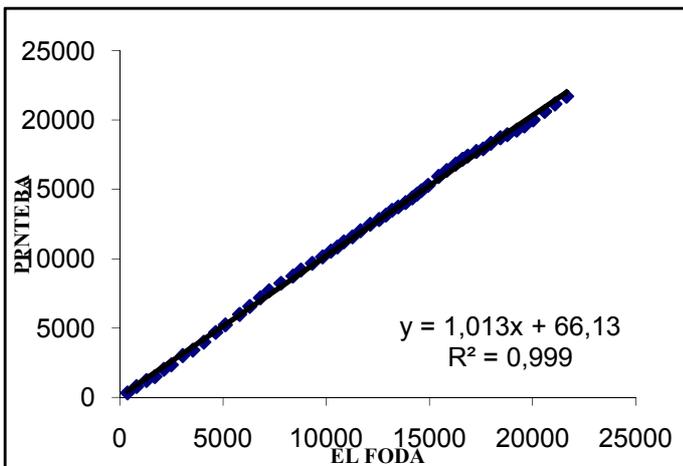
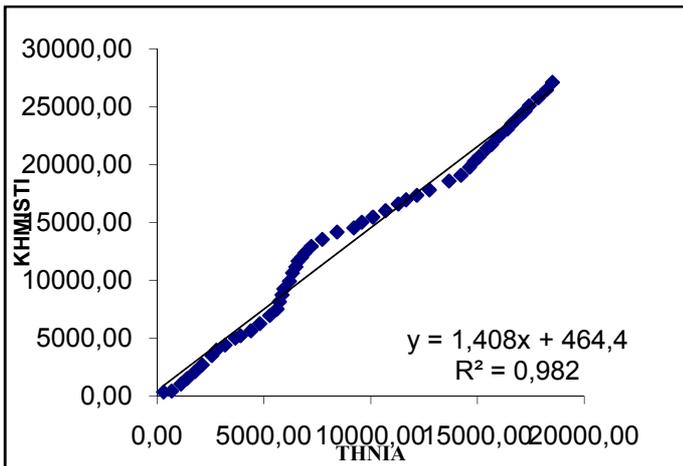
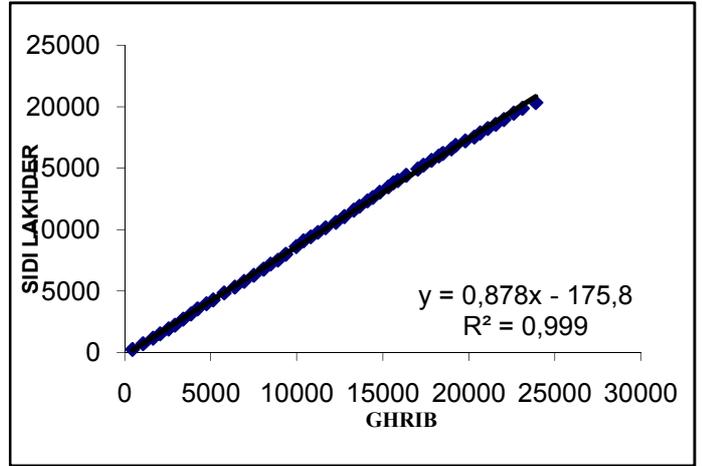
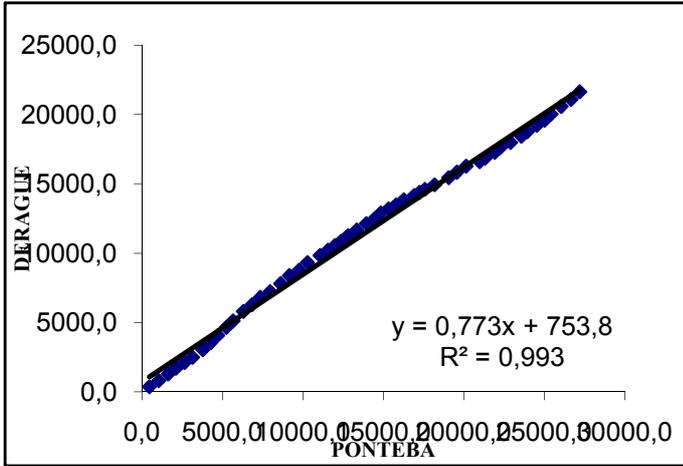
Annexe

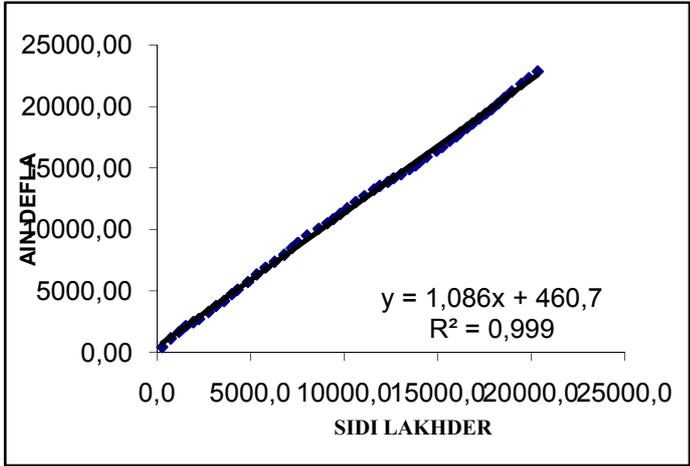
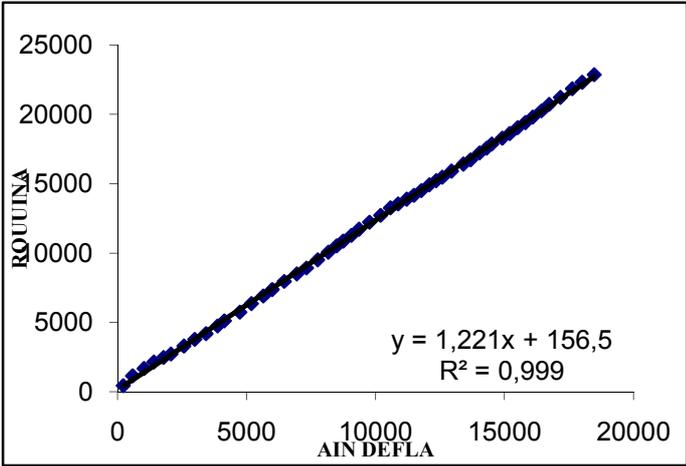
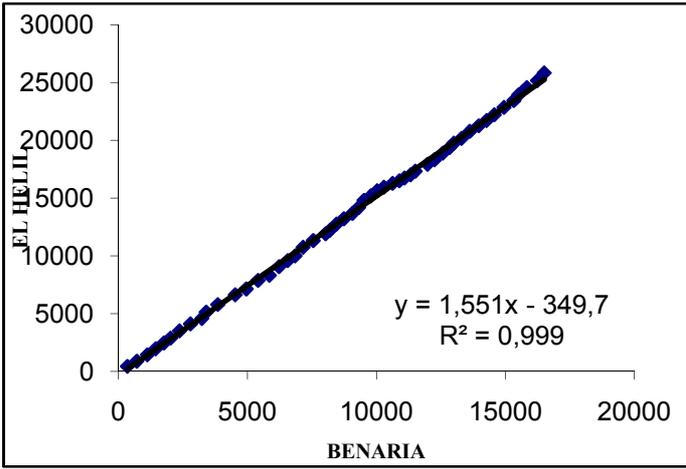
Taleau 01 : Coordonnées géographiques des pluviomètres, régions d'influence autour de chaque station pluviométrique et leur pourcentage dans la plaine totale.

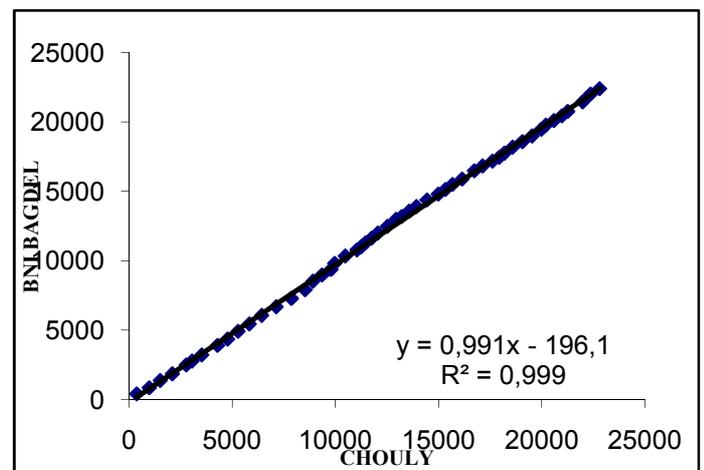
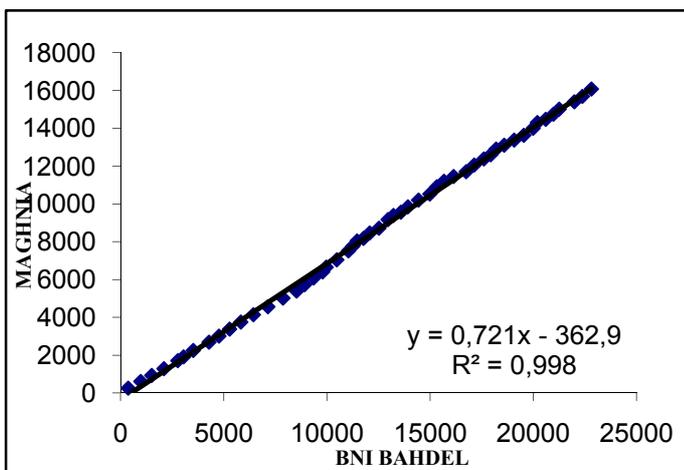
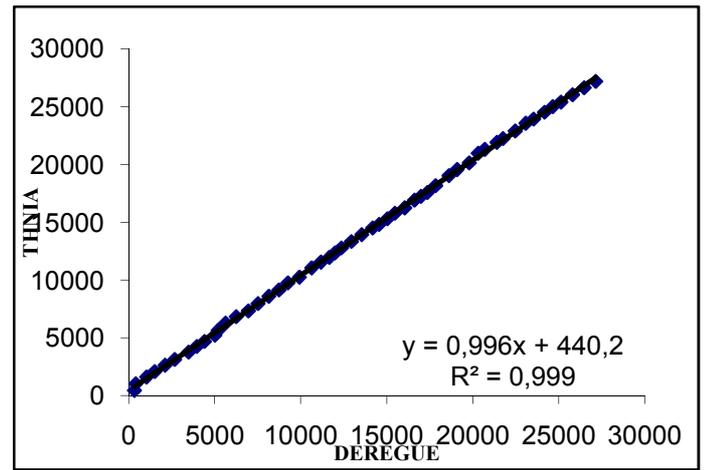
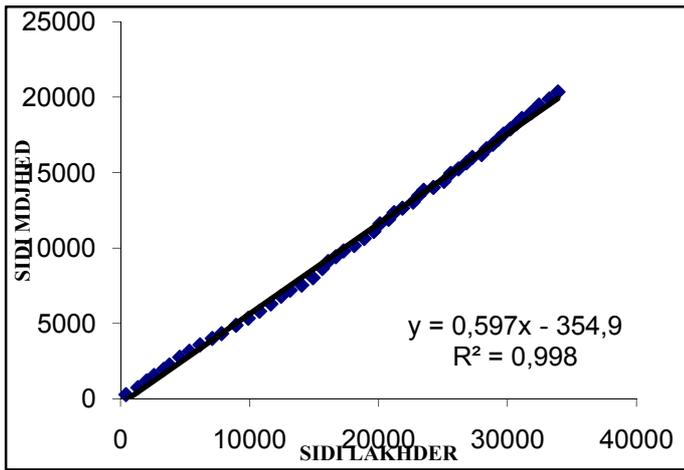
Plaine	Pluviomètre	Latitude (N)	Longitude	Polygon de Thiessen	Surface de la plaine (km ²)	Pourcentage total plaine (%)
Mitidja	Dar el Beidha	36° 41'	3° 13' E	S1	962.43	42.01
	Larbaa	36° 33'	3° 9' E	S2	277.06	12.09
	BoufarikPepiniere	36° 34'	2° 54' E	S3	292.36	12.76
	Beni Mered	36° 31'	2° 51' E	S4	98.01	4.28
	Oued el Alleug	36° 33'	2° 47' E	S5	258.09	11.27
	Ameur el Ain	36° 28'	2° 34' E	S6	403.05	17.59
Haut Cheliff	KhemisMiliana INRA	36° 9'	2° 3' E	S1	1294.90	57.34
	Sidi Lakhdar	36° 13'	1° 51' E	S2	963.51	42.66
Moyen Cheliff	Ain Defla	36° 8'	1° 32' E	S1	490.32	29.66
	RouinaMairie	36° 6'	1° 22' E	S2	709.53	42.92
	Ponteba Barrage	36° 5'	1° 5' E	S3	453.29	27.42
Bas Cheliff	Chlef	35° 56'	1° 6' E	S1	497.54	52.79
	Es Souala Domaine	35° 54'	0° 56' E	S2	444.90	47.21
Ghriss	Maoussa	35° 22'	0° 14' E	S1	303.58	38.24
	Matemore	35° 17'	0° 4' E	S2	490.37	61.76
Sidi Bel Abbes	Sidi Bel Abbes	35° 15'	0° 27' O	S1	368.25	42.02
	HassiZehana	35° 11'	0° 38' O	S2	351.68	40.13
	Ben Badis	35° 4'	0° 40' O	S3	156.38	17.85
Maghnia	Maghnia	34° 47'	1° 42' O	S1	269.71	63.07
	Beni Ouassine	34° 50'	1° 48' O	S2	157.94	36.93











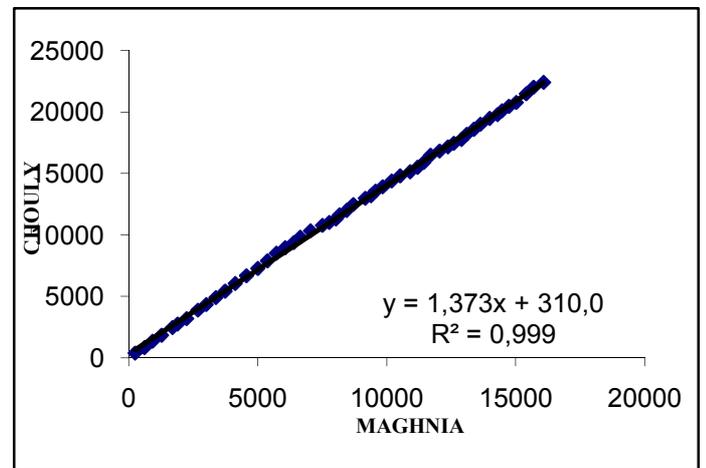
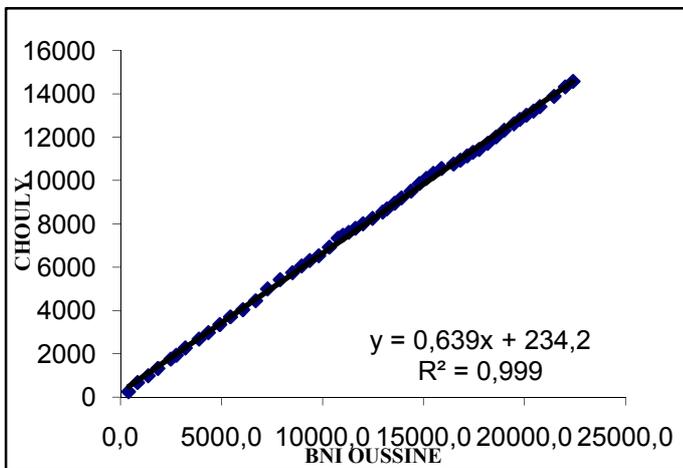
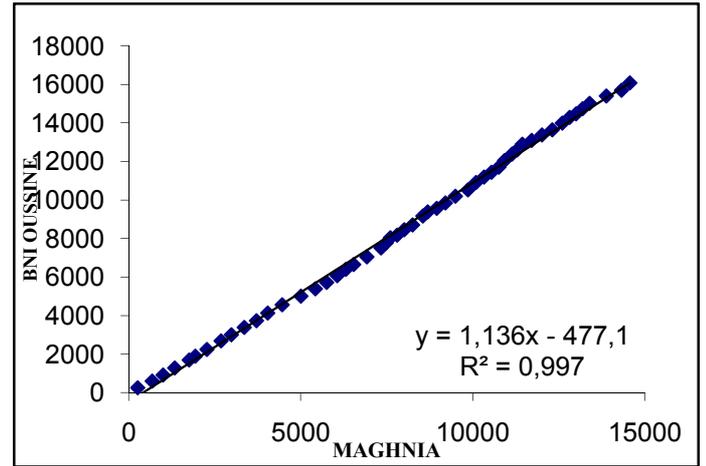
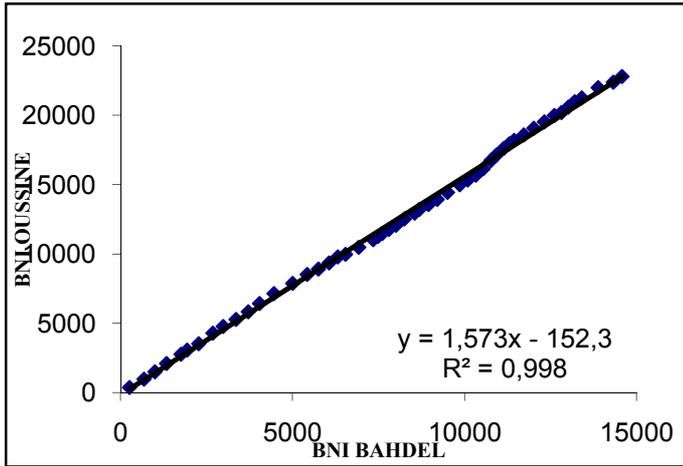
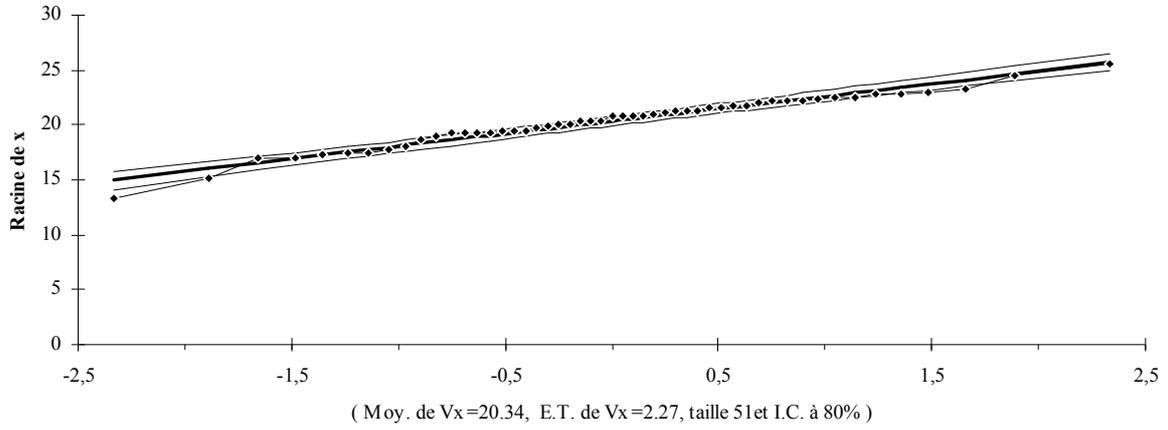
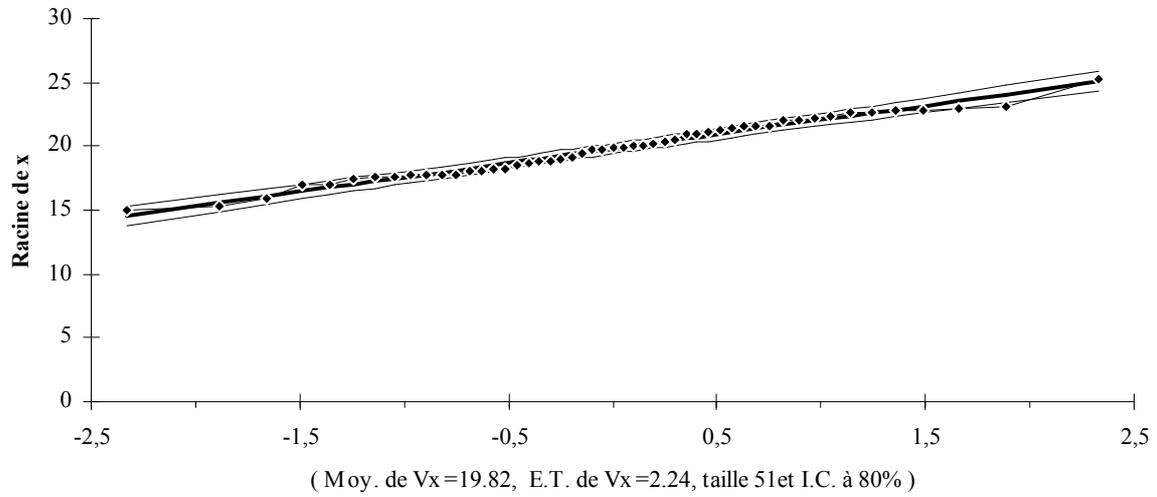


Figure 02: Homogénéisation des données des précipitations par la Méthode du double cumul pour les différentes stations.

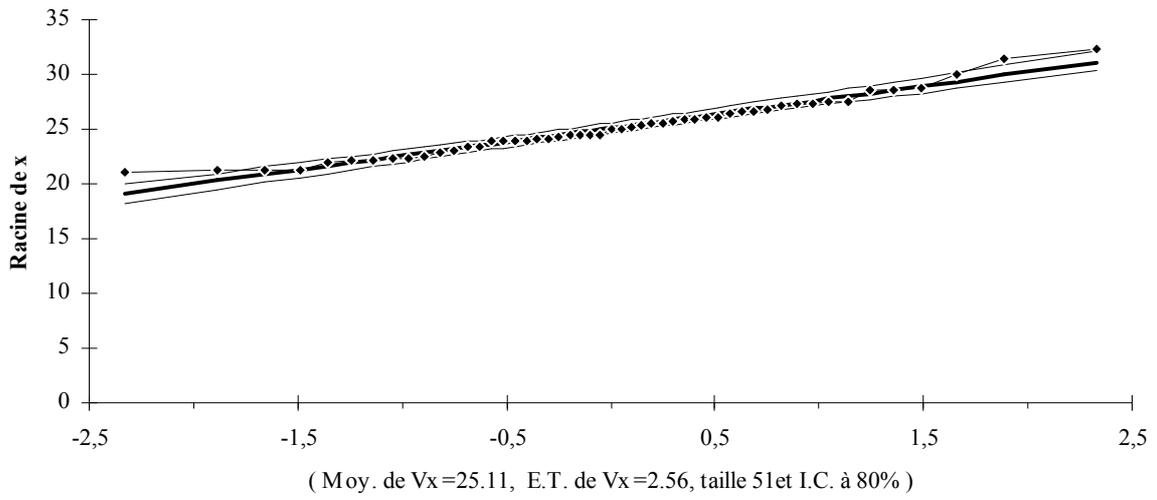
**Ajustement à une loi racine-normale
HAUT CHELIFF**



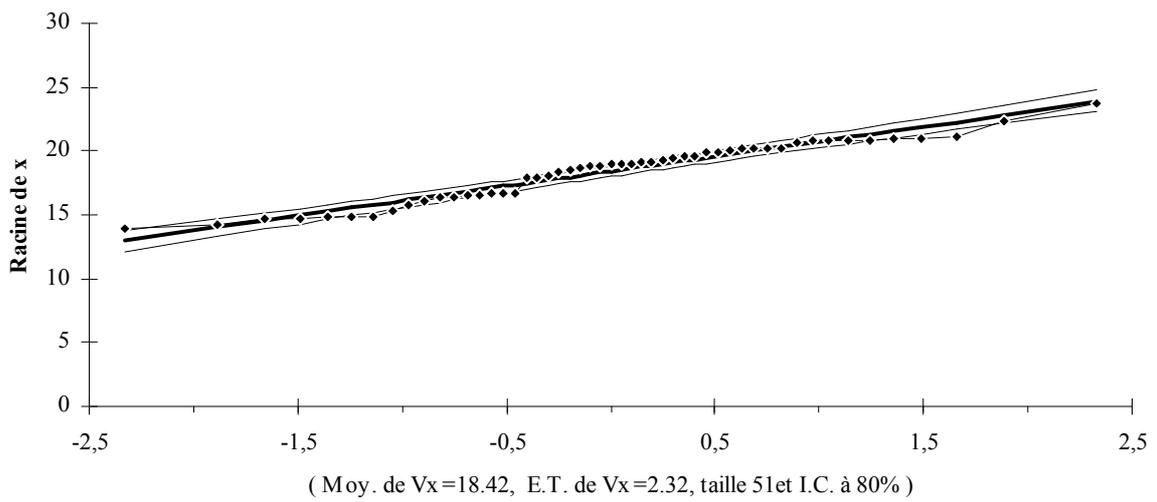
**Ajustement à une loi racine-normale
MOYEN CHELIFF**



**Ajustement à une loi racine-normale
BAS CHELIFF**



**Ajustement à une loi racine-normale
SIDI BEL ABBES**



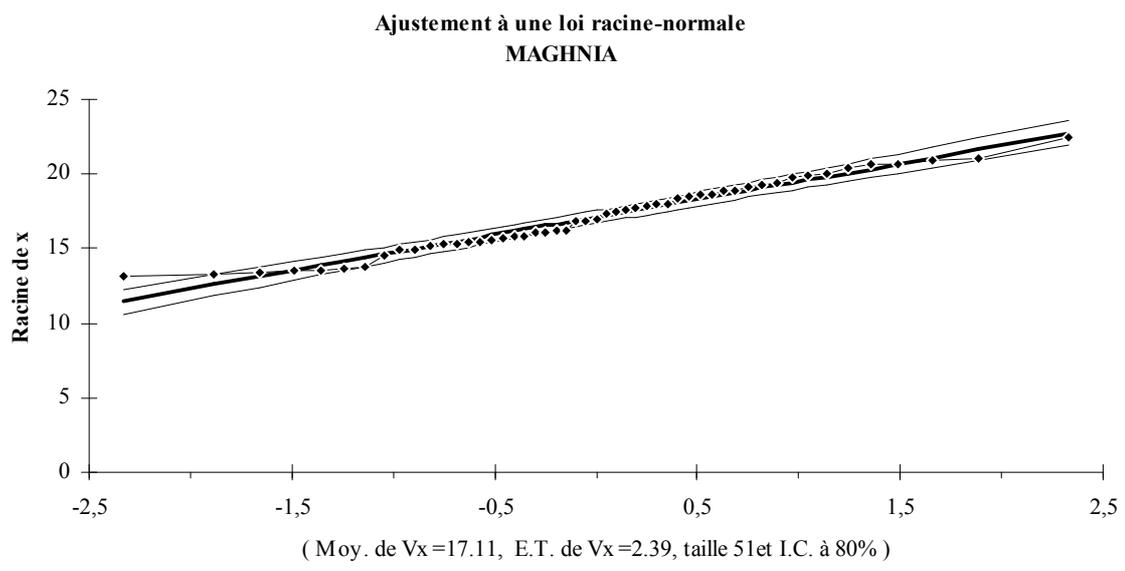
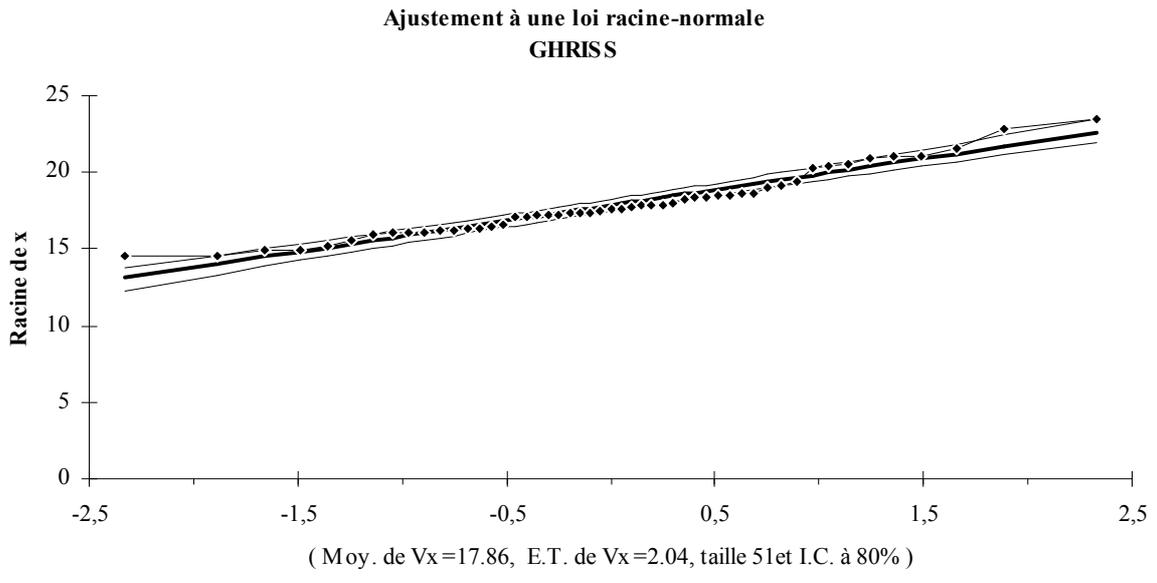


Figure 03: les courbes d'ajustement de loi de racine-normal sur les données de précipitation pour les sept plaines.

Tableau 02: les valeurs des SPIs Automne pour le sept plaines durant la période 1960-2010

Automne	MITIDJA	HAUT CHELIFF	MOYEN CHELIFF	BAS CHELIFF	GHRISS	SIDI BEL ABBES	MAGHNIA
1961	-0,5	0,3	0,0	0,0	0,6	0,4	-0,1
1962	0,9	1,3	0,7	0,1	-0,5	1,1	0,8
1963	-0,6	-0,7	-0,2	0,2	-0,2	-0,1	0,5
1964	1,2	0,6	0,8	1,0	1,2	1,0	0,4
1965	-1,0	-0,4	-0,5	-0,2	2,7	1,0	1,5
1966	-0,3	0,5	0,9	1,7	0,5	1,1	0,0
1967	-0,1	-0,4	0,1	-0,4	0,3	-0,6	-0,2
1968	-0,2	-0,7	-0,1	-0,1	0,9	0,9	0,9
1969	1,4	1,8	2,6	2,2	3,4	2,5	1,5
1970	-0,8	-1,5	-1,0	-0,7	0,2	-0,6	-0,6
1971	1,6	1,0	1,2	0,8	0,7	1,7	1,6
1972	1,5	2,2	2,4	1,8	1,6	1,2	0,4
1973	2,6	-0,3	-0,2	-0,4	1,8	-0,2	1,1
1974	1,7	2,0	1,8	0,7	0,6	1,5	2,4
1975	-0,2	0,6	0,1	-0,1	0,7	0,3	1,5
1976	0,7	2,2	2,3	2,1	1,0	2,0	0,7
1977	-1,7	-0,8	-0,4	-0,1	-0,5	-0,2	0,5
1978	-0,6	0,5	0,7	0,7	-0,9	0,5	-0,7
1979	0,5	1,8	1,5	1,2	0,2	0,3	0,7
1980	-0,6	0,0	-0,8	-0,6	-0,1	-0,7	-0,3
1981	-0,3	-0,2	-0,4	-0,2	-1,3	-0,6	1,0
1982	1,5	1,0	0,0	0,3	0,5	-0,3	-0,5
1983	-2,6	-2,0	-1,4	-1,2	-1,1	-2,6	-2,1
1984	1,3	0,2	0,4	-0,8	-0,1	0,6	-1,1
1985	1,2	-0,2	-0,4	-0,1	-0,2	-1,6	-0,8
1986	0,4	0,8	1,0	0,6	-0,1	-0,4	1,2
1987	0,5	0,6	0,1	0,5	0,5	-0,8	-0,9
1988	-1,2	-1,5	-1,4	-1,7	-0,5	-1,7	-1,4
1989	-0,7	-0,3	-1,0	-1,4	-1,6	-1,6	-1,0
1990	-0,8	-0,7	-1,0	-0,6	-1,0	-0,3	-0,1
1991	0,4	-0,2	-0,8	-1,0	-0,2	0,1	0,2
1992	0,1	0,4	-0,7	-0,5	-0,6	-1,0	0,2
1993	0,0	-1,6	-1,5	-0,8	-1,0	-1,0	0,5
1994	-1,0	-1,6	-1,2	-1,2	-0,9	-0,9	-0,9
1995	-0,1	-0,2	-0,7	-1,6	-1,5	-1,4	-1,1
1996	0,6	0,6	0,6	0,5	1,1	0,8	-0,5
1997	-0,8	-0,3	0,2	1,9	-0,2	-0,7	0,0
1998	0,0	-1,3	-1,0	-1,2	-1,0	-1,1	-1,2
1999	-0,4	-0,1	-0,8	-0,7	-0,4	-0,2	-1,1
2000	-1,4	-0,9	-0,7	0,8	-0,4	-0,1	0,1
2001	-1,2	-0,3	-0,5	-1,1	-0,5	-0,2	-0,7
2002	-1,2	-1,8	-1,5	-1,5	-1,3	-0,6	-1,2
2003	0,6	-0,2	-0,2	0,2	-1,1	-0,2	-0,2
2004	-0,3	-0,6	-0,6	-0,7	0,2	0,4	-0,1
2005	-0,3	-0,5	-0,6	-0,4	-0,7	0,2	-0,7
2006	-0,6	-0,9	-0,9	-1,5	-1,1	-0,1	-1,3
2007	0,8	1,5	1,8	1,1	0,8	0,6	-0,1
2008	-0,8	-0,5	-0,6	-0,7	-0,9	0,3	0,2
2009	0,1	0,2	1,0	1,6	0,3	1,4	1,0
2010	0,3	1,2	1,2	1,8	0,9	0,7	0,3

Tableau 03: les valeurs des SPIs Hivers pour le sept plaines durant la période 1960-2010

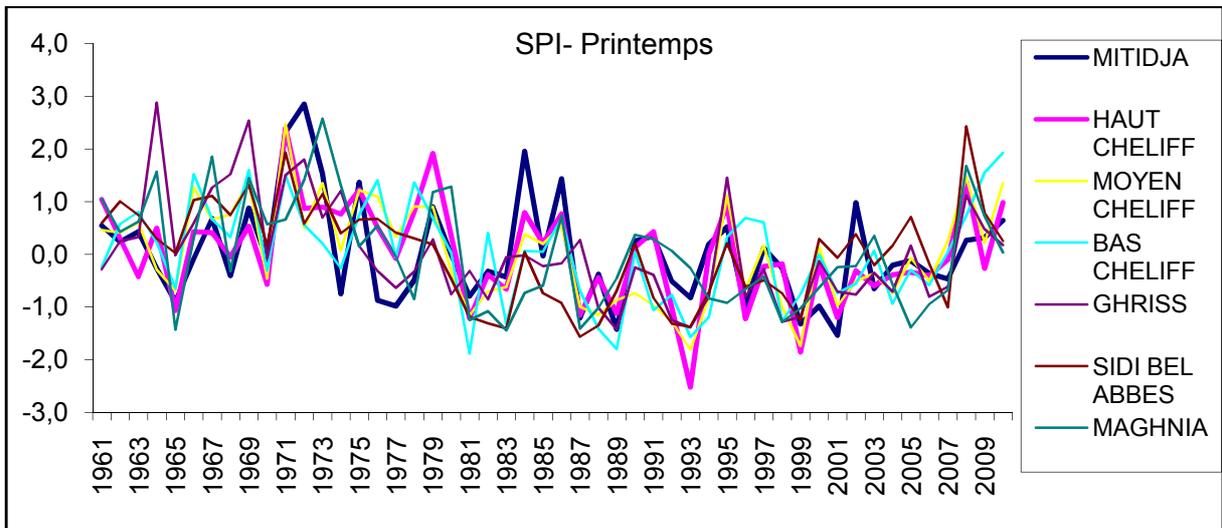
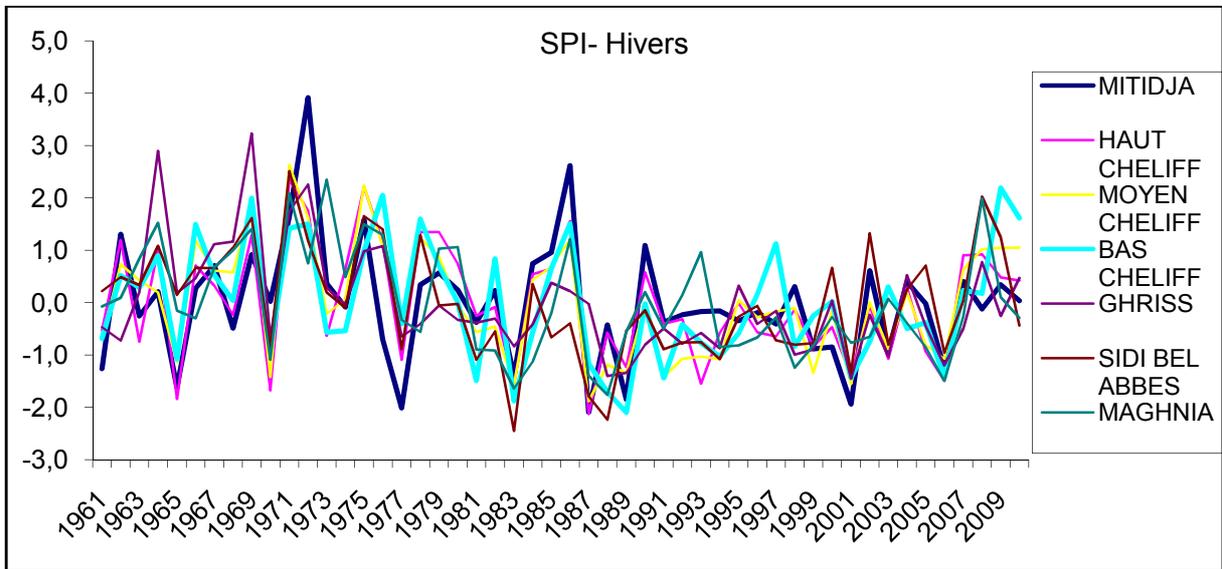
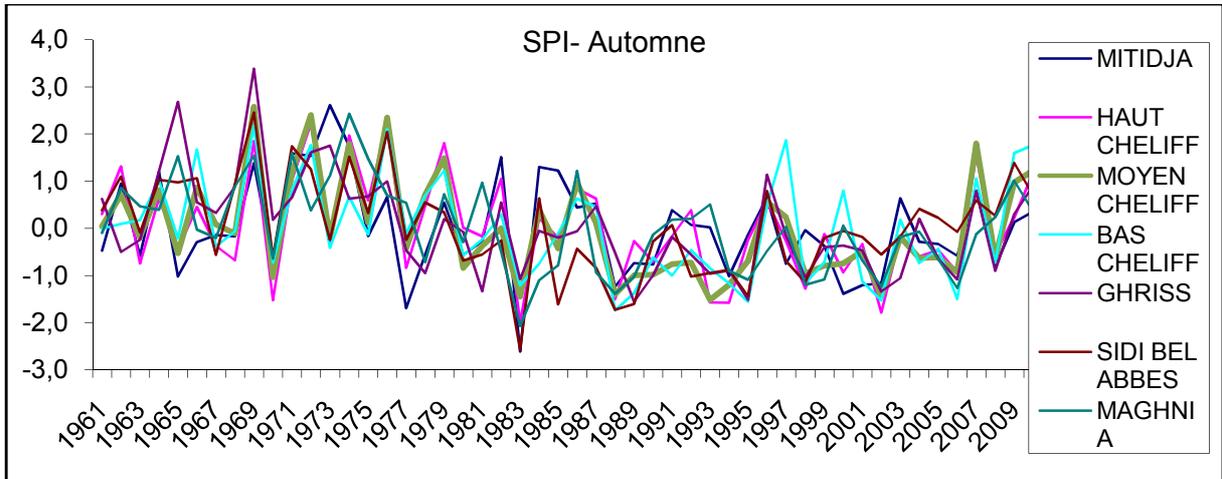
	MITIDJA	HAUT CHELIFF	MOYEN CHELIFF	BAS CHELIFF	GHRISS	SIDI BEL ABBES	MAGHNIA
1961	-1,3	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	0,2	-0,1
1962	1,3	1,2	0,7	0,5	-0,7	0,5	0,1
1963	-0,3	-0,7	0,4	0,3	0,2	0,3	0,8
1964	0,2	1,0	0,2	0,9	2,9	1,1	1,5
1965	-1,6	-1,8	-1,1	-1,1	0,2	0,1	-0,2
1966	0,3	0,7	1,2	1,5	0,5	0,7	-0,3
1967	0,7	0,3	0,6	0,5	1,1	0,7	0,7
1968	-0,5	-0,2	0,6	0,0	1,2	1,0	1,0
1969	0,9	1,3	1,8	2,0	3,2	1,6	1,4
1970	0,0	-1,7	-1,4	-0,9	-0,7	-0,9	-1,1
1971	1,6	2,3	2,6	1,4	1,7	2,5	2,1
1972	3,9	1,8	1,6	1,5	2,3	1,2	0,8
1973	0,4	-0,6	-0,2	-0,6	0,3	0,2	2,3
1974	-0,1	0,6	0,1	-0,5	0,0	-0,1	0,5
1975	1,6	2,2	2,2	1,0	1,0	1,7	1,5
1976	-0,7	1,2	1,1	2,0	1,1	1,4	1,3
1977	-2,0	-1,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-0,3
1978	0,3	1,3	1,2	1,6	-0,4	1,3	-0,6
1979	0,6	1,3	0,9	0,7	-0,1	-0,1	1,0
1980	0,2	0,7	-0,1	0,0	-0,3	0,0	1,1
1981	-0,4	-0,3	-0,6	-1,5	-0,4	-1,1	-0,9
1982	0,2	-0,1	-0,5	0,8	-0,3	-0,6	-0,9
1983	-1,4	-1,6	-1,6	-1,9	-0,8	-2,5	-1,6
1984	0,7	0,5	0,4	-0,6	-0,4	0,3	-1,1
1985	1,0	0,6	0,7	0,7	0,4	-0,7	-0,2
1986	2,6	1,6	1,2	1,5	0,2	-0,4	1,2
1987	-2,1	-2,1	-1,9	-1,2	0,0	-1,8	-1,4
1988	-0,4	-0,6	-1,2	-1,7	-1,4	-2,2	-1,8
1989	-1,9	-1,2	-1,3	-2,1	-1,3	-0,5	-0,6
1990	1,1	0,6	0,0	0,0	-0,8	-0,1	0,2
1991	-0,4	-0,4	-1,4	-1,4	-0,5	-0,9	-0,5
1992	-0,2	-0,3	-1,1	-0,4	-0,8	-0,8	0,1
1993	-0,2	-1,5	-1,0	-0,8	-0,6	-0,8	1,0
1994	-0,2	-0,6	-1,1	-1,0	-0,9	-1,1	-0,8
1995	-0,3	0,0	0,0	-0,6	0,3	-0,3	-0,8
1996	-0,2	-0,6	-0,3	0,2	-0,4	-0,1	-0,7
1997	-0,4	-0,6	-0,2	1,1	-0,2	-0,7	-0,3
1998	0,3	-0,1	-0,1	-0,8	-1,0	-0,8	-1,2
1999	-0,9	-0,8	-1,3	-0,2	-0,9	-0,8	-0,8
2000	-0,9	-0,5	-0,2	0,0	0,0	0,7	-0,3
2001	-1,9	-1,4	-1,6	-1,4	-1,4	-1,3	-0,8
2002	0,6	-0,1	0,0	-0,7	-0,2	1,3	-0,7
2003	-0,9	-1,1	-0,9	0,3	-1,0	-0,8	0,1
2004	0,4	0,3	0,2	-0,5	0,5	0,2	-0,4
2005	0,0	-0,9	-0,8	-0,4	-0,4	0,7	-0,9
2006	-1,3	-1,5	-1,1	-1,4	-1,2	-1,0	-1,5
2007	0,4	0,9	0,6	0,2	-0,5	0,0	-0,3
2008	-0,1	0,9	1,0	0,2	0,8	2,0	2,0
2009	0,3	0,5	1,0	2,2	-0,3	1,2	0,1
2010	0,0	0,4	1,0	1,6	0,5	-0,4	-0,3

Tableau 04: les valeurs des SPIs Printemps pour le sept plaines durant la période 1960-2010

Printemps	MITIDJA	HAUT CHELIFF	MOYEN CHELIFF	BAS CHELIFF	GHRISS	SIDI BEL ABBES	MAGHNIA
1961	0,5	1,0	0,5	-0,2	-0,3	0,6	1,1
1962	0,2	0,3	0,4	0,6	0,2	1,0	0,4
1963	0,4	-0,4	0,6	0,8	0,3	0,7	0,6
1964	-0,3	0,5	-0,3	0,2	2,9	0,3	1,6
1965	-0,9	-1,1	-0,7	-0,6	0,0	0,0	-1,4
1966	-0,1	0,4	1,3	1,5	0,6	1,0	0,3
1967	0,7	0,4	0,7	0,7	1,3	1,1	1,9
1968	-0,4	0,0	0,8	0,3	1,5	0,7	-0,3
1969	0,9	0,5	1,4	1,6	2,5	1,3	1,4
1970	-0,1	-0,6	-0,5	-0,3	-0,1	0,2	0,6
1971	2,3	2,4	2,5	1,5	1,5	1,9	0,7
1972	2,9	0,9	0,5	0,6	1,8	0,6	1,4
1973	1,5	0,9	1,4	0,2	0,7	1,1	2,6
1974	-0,8	0,8	0,1	-0,3	1,2	0,4	1,3
1975	1,4	1,2	1,2	0,8	0,2	0,7	0,2
1976	-0,9	0,5	1,1	1,4	-0,3	0,7	0,5
1977	-1,0	-0,1	0,3	-0,1	-0,6	0,4	0,0
1978	-0,5	0,8	0,9	1,4	-0,3	0,3	-0,9
1979	0,9	1,9	0,9	0,7	0,3	0,2	1,2
1980	0,0	0,3	-0,3	0,0	-0,8	-0,5	1,3
1981	-0,8	-1,2	-1,2	-1,9	-0,3	-1,2	-1,3
1982	-0,3	-0,4	-0,7	0,4	-0,9	-1,3	-1,1
1983	-0,4	-0,7	-0,6	-1,3	-0,1	-1,4	-1,4
1984	2,0	0,8	0,4	0,1	0,0	0,0	-0,7
1985	0,0	0,2	0,2	0,0	-0,2	-0,7	-0,6
1986	1,4	0,8	0,5	0,7	-0,2	-0,9	0,7
1987	-1,2	-1,2	-1,0	-0,7	0,3	-1,6	-1,4
1988	-0,4	-0,4	-1,1	-1,4	-1,0	-1,4	-1,0
1989	-1,4	-1,1	-0,9	-1,8	-1,4	-0,7	-0,5
1990	0,3	0,1	-0,7	0,0	-0,2	0,2	0,4
1991	0,3	0,4	-1,0	-1,1	-0,4	-0,8	0,3
1992	-0,5	-1,0	-1,3	-0,8	-1,3	-1,3	0,1
1993	-0,8	-2,5	-1,8	-1,6	-1,4	-1,4	-0,3
1994	0,2	0,0	-0,8	-1,2	-0,8	-0,7	-0,8
1995	0,5	0,9	1,1	0,3	1,5	0,2	-0,9
1996	-1,0	-1,2	-0,7	0,7	-0,8	-0,6	-0,7
1997	0,1	-0,2	0,2	0,6	-0,3	-0,5	-0,4
1998	-0,3	-0,2	-1,0	-1,3	-1,3	-0,7	-1,3
1999	-1,3	-1,9	-1,7	-0,8	-1,2	-1,3	-1,0
2000	-1,0	-0,2	0,1	0,0	-0,1	0,3	-0,6
2001	-1,5	-1,2	-1,0	-0,7	-0,7	-0,1	-0,2
2002	1,0	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	0,4	-0,2
2003	-0,7	-0,6	-0,4	0,1	-0,4	-0,2	0,3
2004	-0,2	-0,4	-0,7	-0,9	-0,7	0,2	-0,6
2005	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	0,2	0,7	-1,4
2006	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-0,2	-1,0
2007	-0,5	-0,1	0,3	0,0	-0,6	-1,0	-0,7
2008	0,3	1,4	1,5	0,7	1,1	2,4	1,7
2009	0,3	-0,3	0,2	1,6	0,5	0,8	0,7
2010	0,6	1,0	1,4	1,9	0,2	0,3	0,0

Tableau 05: les valeurs des SPIs été pour le sept plaines durant la période 1960-2010

été	MITIDJA	HAUT CHELIFF	MOYEN CHELIFF	BAS CHELIFF	GHRISS	SIDI BEL ABBES	MAGHNIA
1961	0,8	0,9	0,4	-0,2	-0,3	0,6	1,2
1962	0,2	0,5	0,7	0,9	0,2	0,9	0,2
1963	0,2	-0,6	0,0	0,4	0,3	0,6	0,6
1964	-0,3	0,4	0,0	0,3	2,9	0,6	1,5
1965	-1,0	-1,1	-0,9	-0,9	0,0	-0,2	-1,4
1966	-0,1	0,8	1,4	1,6	0,6	1,0	0,5
1967	0,7	0,2	0,6	0,7	1,3	1,1	1,6
1968	-0,3	0,2	0,7	0,3	1,5	1,0	0,1
1969	0,7	0,3	1,3	1,5	2,5	1,0	0,9
1970	0,0	-0,5	-0,5	-0,4	-0,1	0,4	0,7
1971	2,5	2,5	2,5	1,6	1,5	1,7	0,7
1972	2,9	0,9	0,9	0,6	1,8	0,7	1,6
1973	1,2	0,8	1,0	0,1	0,7	1,0	2,5
1974	-0,5	0,8	-0,1	-0,1	1,2	0,4	1,2
1975	1,3	1,3	1,3	1,0	0,2	0,7	0,5
1976	-1,0	0,6	1,4	1,4	-0,3	0,7	0,3
1977	-1,0	-0,3	-0,1	-0,4	-0,6	0,4	-0,2
1978	-0,5	0,8	1,1	1,3	-0,3	0,2	-0,8
1979	0,9	1,9	0,8	0,7	0,3	0,2	1,1
1980	0,1	0,4	-0,3	0,0	-0,8	-0,1	1,7
1981	-0,8	-1,2	-1,2	-1,9	-0,3	-1,6	-1,3
1982	-0,4	-0,4	-0,7	0,5	-0,9	-1,3	-1,4
1983	-0,4	-0,4	-0,4	-1,1	-0,1	-1,4	-1,5
1984	1,9	0,5	0,2	-0,1	0,0	0,0	-0,7
1985	0,2	0,4	0,6	0,1	-0,2	-0,7	-0,6
1986	1,3	1,0	0,2	0,7	-0,2	-0,8	0,8
1987	-1,1	-1,3	-0,9	-0,6	0,3	-1,6	-1,5
1988	-0,4	0,0	-0,9	-1,4	-1,0	-1,3	-0,9
1989	-1,4	-1,4	-1,2	-1,8	-1,4	-0,7	-0,4
1990	0,1	0,0	-0,8	-0,1	-0,2	0,2	0,3
1991	0,5	0,5	-0,7	-0,9	-0,4	-0,7	0,6
1992	-0,6	-1,3	-1,5	-0,9	-1,3	-1,4	0,0
1993	-0,8	-2,6	-1,8	-1,7	-1,4	-1,4	-0,5
1994	0,3	0,1	-0,4	-1,1	-0,8	-0,8	-0,8
1995	0,5	1,1	0,9	0,4	1,5	1,0	-0,8
1996	-1,0	-1,4	-0,7	0,7	-0,8	-1,0	-0,7
1997	0,0	-0,3	0,0	0,5	-0,3	-0,8	-0,4
1998	-0,3	0,0	-1,0	-1,4	-1,3	-0,8	-1,4
1999	-1,3	-2,0	-1,7	-0,7	-1,2	-1,2	-1,0
2000	-1,0	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	0,2	-0,6
2001	-1,3	-1,0	-0,9	-0,7	-0,7	0,1	-0,1
2002	0,8	-0,5	-0,6	-0,2	-0,8	0,3	-0,2
2003	-0,7	-0,5	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	0,2
2004	-0,3	-0,5	-0,9	-1,0	-0,7	0,1	-0,6
2005	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	0,2	0,7	-1,4
2006	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-0,3	-0,9
2007	-0,4	0,1	0,5	0,0	-0,6	-0,9	-0,7
2008	0,3	1,1	1,3	0,9	1,1	2,4	1,7
2009	0,5	0,2	0,5	1,8	0,5	1,0	0,9
2010	0,6	0,7	1,2	1,8	0,2	0,2	0,1



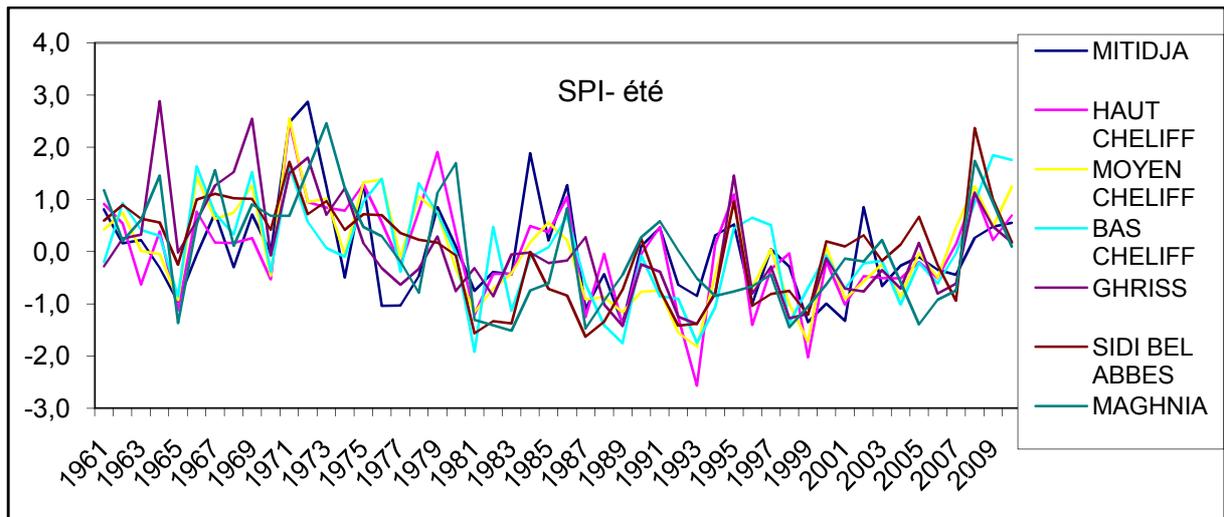


Figure 04: variation de SPIs saisonniere pour les sept plaines durant la periode 1960-2010

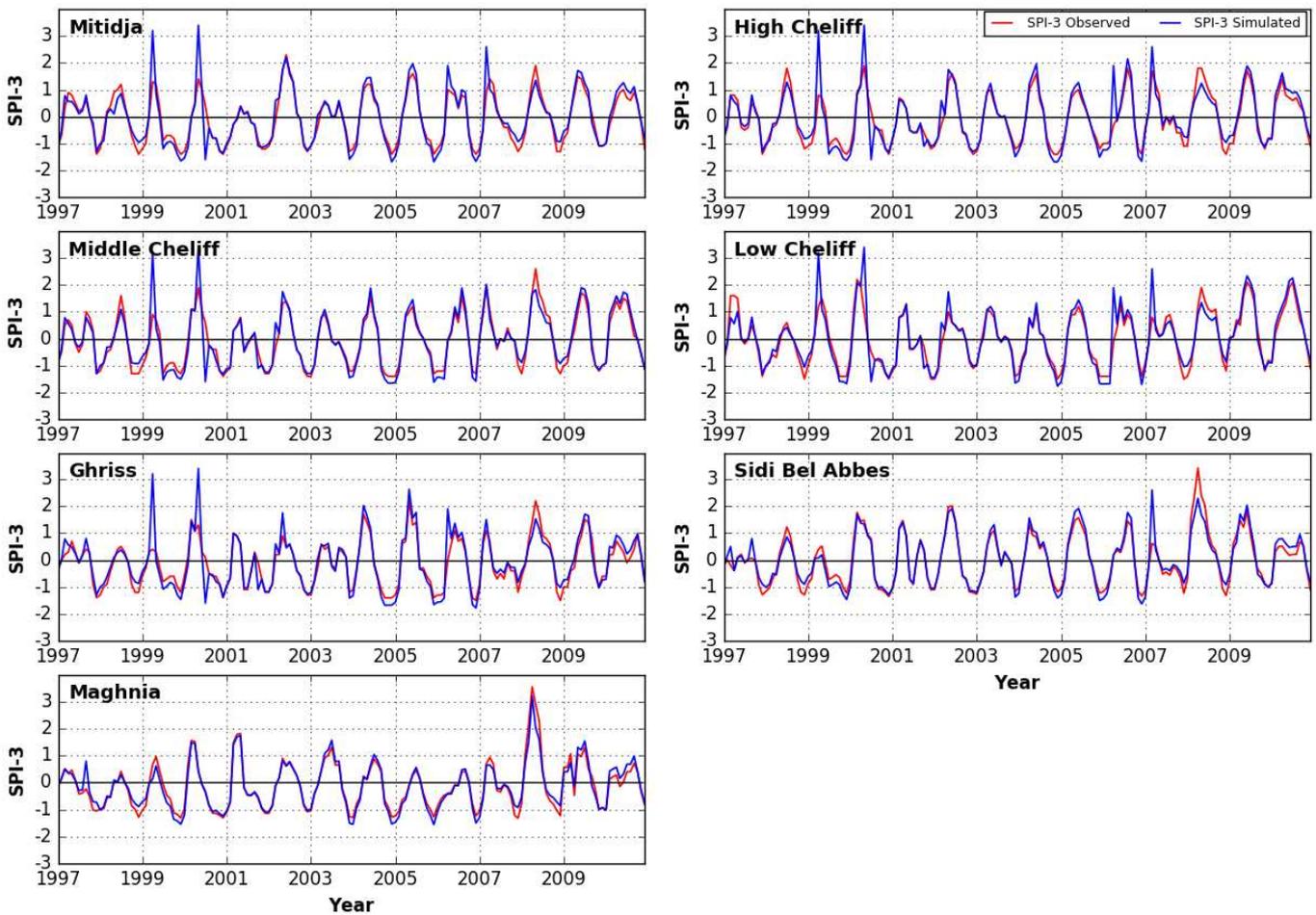


Figure 05 : Comparaison des SPI 3 observés et simulés pendant la phase de validation pour les sept plaines étudiées

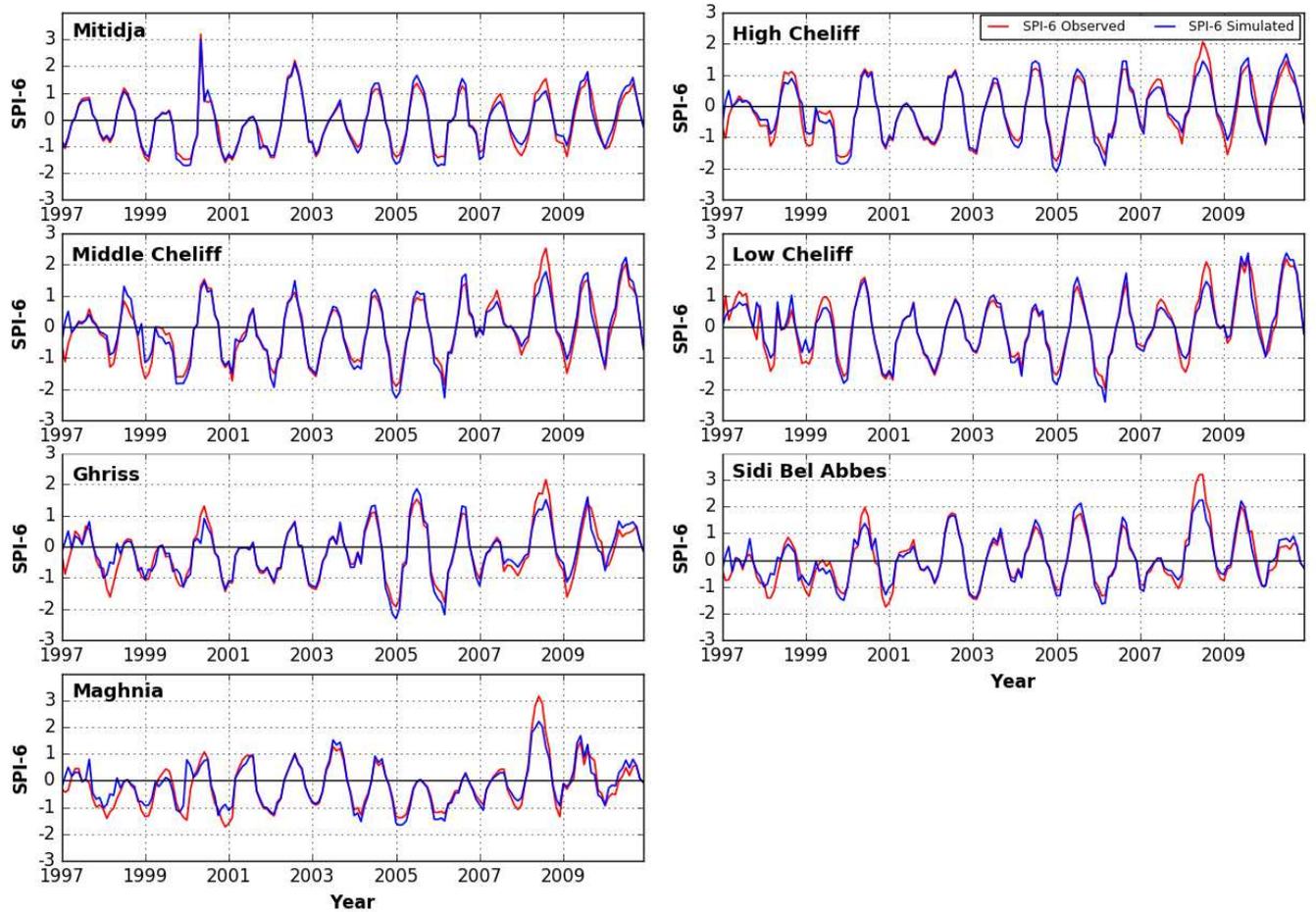


Figure 06: Comparaison des SPI6 observés et simulés au cours de la phase de validation pour les sept plaines étudiées

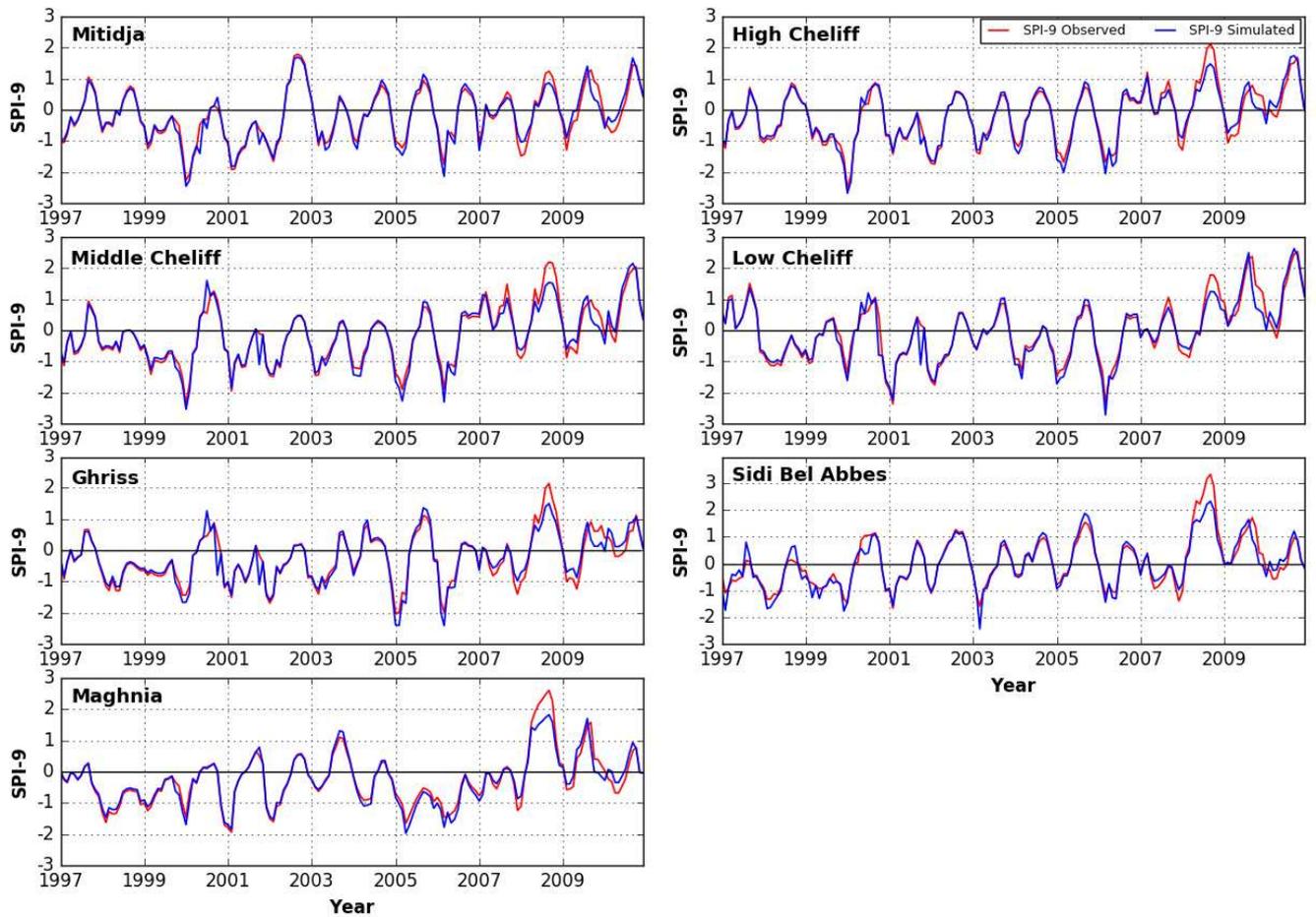


Figure 07: Comparaison des IPS 9 observés et simulés pendant la phase de validation pour les sept plaines étudiées.