

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Caractérisation, variabilité et prévision de la sécheresse dans le Nord-Est Algérien.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 8-0001-18

APA Citation (توثيق APA):

Merabti, Abdelaziz. (2018). Caractérisation, variabilité et prévision de la sécheresse dans le Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مباحث، مقالات الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



ENSH-(n° d'ordre)

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

Monsieur **MERABTI Abdelaziz**

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'HYDRAULIQUE

Sujet de la thèse :

Caractérisation, variabilité et prévision de la sécheresse dans le Nord-est Algérien

Thèse présentée et soutenue à Blida le 26/04/2018 devant le jury composé de :

M. SALAH. B	Professeur ENSH	Président
M. MEBARKI A.	Professeur Université de Constantine	Examineur
M. BERREKSI A.	MCA Université de Bejaia	Examineur
M. BENLAOUKLI B.	MCA ENSH	Examineur
M. MEDDI M.	Professeur ENSH	Directeur de thèse
M. PEREIRA L.S.	S-Professeur Université de Lisbonne (Portugal)	Co-Directeur de thèse

Table des matières

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1. Revue de littérature	
Introduction	7
1.1. Les changements climatiques	7
1.1.1. Le climat un système complexe	7
1.1.2. Les indicateurs de l'évolution climatique	9
1.1.2.1. L'augmentation de la température de surface sur la terre	9
1.1.2.2. La température et le niveau moyen des océans	10
1.1.2.3. La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques ainsi les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland	11
1.1.2.4. Le Sahara	11
1.1.3. Les éléments réagissant sur le climat	12
1.1.3.1. Les fluctuations des paramètres orbitaux	12
1.1.3.2. Les rayonnements solaires	13
1.1.3.3. L'activité volcanique	13
1.1.3.4. Les océans, véritables régulateurs thermiques	14
1.1.3.5. Les gaz à effet de serre	14
1.1.4. Les impacts des changements climatiques	15
1.1.4.1. Sur l'eau et les évènements extrêmes	15
1.1.4.2. Impacts sur le secteur agricole	16
1.1.4.3. La catastrophe climatique en Algérie en novembre 2001	17
1.1.4.4. L'exode climatique, les feux de forêts entre autres	18
1.2. La sécheresse	18
1.2.1. Définition de la sécheresse	19
1.2.2. Types de sécheresse	19
1.2.2.1. Sécheresse météorologique	19
1.2.2.2. Sécheresse agronomique ou agricole	20

1.2.2.3.	Sécheresse hydrologique	20
1.2.3.	Caractérisation de la sécheresse	21
1.2.3.1.	L'intensité	21
1.2.3.2.	La durée	21
1.2.3.3.	L'étendue spatiale	22
1.2.4.	Études antérieures sur la sécheresse	22
	Conclusion	24
Chapitre 2 Cadre d'étude		
	Introduction	26
2.1.	Localisation de la zone d'étude	26
2.2.	Le relief	27
2.3.	Contexte géologique	29
2.4.	Le réseau hydrographique	30
2.5.	Contexte climatique	32
2.5.1.	Le climat	32
2.5.2.	Les précipitations	32
2.5.3.	Les températures	34
2.5.4.	L'évapotranspiration	34
2.5.5.	Le sirocco	36
	Conclusion	36
Chapitre 3 Matériels et méthodes		
	Introduction	39
3.1.	Analyse et traitement des données de précipitations	40
3.1.1.	Critiques et choix des stations	40
3.1.2.	Méthode de comblement des lacunes	43
3.1.3.	Étude de l'homogénéité des données	47
3.1.3.1.	Méthode numérique (Test de Wilcoxon)	48
3.1.3.2.	La méthode graphique de simple et de double cumul	48
3.1.4.	Synthèses des résultats d'homogénéisation	49
3.1.5.	Étude des ruptures dans les séries	54

3.2. Données de ré-analyse	59
3.3. L'application des divers indices de sécheresse	60
3.3.1. L'indice de précipitation normalisé « SPI »	61
3.3.2. L'indice Z score « Z-score »	63
3.3.3. L'indice China Z et l'indice modifié de China Z « CZI et MCZI »	63
3.3.4. L'indice de pourcentage à la normale « PNI »	64
3.3.5. L'indice efficace de sécheresse « EDI »	64
3.3.6. L'indice de décile « ID »	65
3.3.7. L'indice de reconnaissance de sécheresse « RDI »	65
3.4. Processus Markovien	66
3.4.1. Définition mathématique	67
3.4.2. Application des chaines de Markov pour la prévision de sécheresse	67
3.5. L'indice d'aridité et l'indice de concentration des précipitations	68
3.5.1. L'indice d'aridité (IA)	68
3.5.2. L'indice de concentration de précipitation	69
3.6. L'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)	70
3.7. Test de tendance de Mann-Kendall modifié	71
Conclusion	72
Chapitre 4 Résultats et discussions	
Introduction	75
4.1. Analyse de la sécheresse entre la période 1960-2014 en utilisant l'indice SPI-12	76
4.4.1. La décennie de l'année hydrologique 1960-61 au 1969-70 figure (4.1)	76
4.4.2. La décennie de l'année hydrologique 1970-71 au 1979-80 figure (4.2)	76
4.4.3. La décennie de l'année hydrologique 1980-70 au 1989-90 figure (4.3)	79
4.4.4. La décennie de l'année hydrologique 1990-90 au 1999-2000 figure (4.4)	79
4.4.5. De l'année hydrologique 2000-01 au 2013-14 figure (4.5a,b)	82
4.2. Comparaison de sept indices de sécheresse, application sur sept plaines du Nord-Est Algérien	84
4.2.1. Méthode des polygones de Thiessen sur les plaines de la région	84
4.2.2. Évaluation et comparaison de sept indices de sécheresse application sur les sept plaines	87

4.3. Prédiction de la sécheresse utilisant le modèle Markovien sur sept plaines du Nord-est Algérien	102
4.3.1. Processus de Markov d'ordre I	103
4.3.2. Processus de Markov d'ordre II	107
4.1. Comparaison entre SPI et RDI appliqués à l'échelle locale sous l'influence de climat	111
4.1.1. Choix des stations	111
4.1.2. Comparaison entre l'indice SPI et RDI à l'échelle locale	113
4.1.2.1. La variabilité temporelle des indices SPI et RDI	113
4.1.2.2. L'analyse de régression reliant les indices SPI et RDI à différentes échelle de temps	115
4.1.3. Identification des fréquences des évènements sèches et humides pour les différents climats	115
4.2. Variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse basée sur SPI et RDI à différentes échelles de temps	119
4.2.1. Variabilité spatiale de la sécheresse en utilisant l'Analyse en composantes principales	119
4.2.2. Étude de tendance de la sécheresse en employant le test de MMK	122
4.2.3. Les fréquences des évènements secs et humides par rapport aux composantes principales rotatives (RCP)	126
Conclusion	127
Conclusion générale	130
Références	135
Annexes	145

Liste des figures

Fig. 1.1 Différentes composantes du système climatique	8
Fig. 1.2 L'évolution des températures moyennes dans les deux hémisphères	9
Fig. 1.3 L'évolution des températures moyennes depuis 4500 ans	10
Fig. 1.4 L'effet de serre	14
Fig. 1.5 Évolution prévue en Afrique de la production céréalières entre 2000 et 2080 scénarios A2 du GIEC	17
Fig. 1.6 Les caractéristiques de la sécheresse, exemple en utilisant l'indice SPI-12 sur la région d'Annaba période 1960-1972	21
Fig. 2.1 Relief de la région d'étude caractérisant les différentes plaines	27
Fig. 2.2 Le découpage de la région en bassins Hydrographiques	30
Fig. 2.3 Répartition graphique des précipitations annuelles aux stations de Jijel, Ain Beida et M'sila pour la période étalant de l'année hydrologique 1960-1961 à 2013-2014	33
Fig. 2.4 La moyenne mensuelle d'évapotranspiration potentielle des mois de Juillet et de Janvier	35
Fig. 2.5 La moyenne mensuelle d'évapotranspiration potentielle des mois Avril (Mebarki 2007)	36
Fig. 3.1 Les valeurs propres des composantes principales	43
Fig. 3.2 Test de Wilcoxon sur la station METLATINE	50
Fig. 3.3. Méthode de simple cumul de la station METLATINE '030317'	50
Fig. 3.4 Méthode de double entre de la station METLATINE et MRABET MOUSSA valeurs annuelles	50
Fig. 3.5 Méthode de double cumul entre de la station METLATINE et MRABET MOUSSA avec les valeurs de la saison d'été	51
Fig. 3.6 Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052002	53
Fig. 3.7 Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052102	53

Fig. 3.8 Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052003 jugé homogène	53
Fig. 3.9 Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052002 après correction	54
Fig. 3.10 Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052102 après correction	54
Fig. 3.11 La distribution des stations météorologiques issues des données CFSR dans la région d'étude.	59
Fig. 4.1 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1960-61 au 1969-70	77
Fig. 4.2 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1970-71 au 1979-80	78
Fig. 4.3 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1980-81 au 1989-90	80
Fig. 4.4 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1990-91 au 1999-2000	81
Fig. 4.5a Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 2000-01 au -2003-04	82
Fig. 4.5b Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 2004-05 au -2013-14	83
Fig. 4.6 Application de la méthode classique des polygones de Thiessen sur sept plaines de la région	84
Fig. 4.7 La variabilité temporelle de la sécheresse dans les sept plaines utilisant le SPI-12	88
Fig. 4.8 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PN, RDDI à l'échelle de 1 mois sur les différentes plaines	90
Fig. 4.9 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PN, RDDI à l'échelle de 3 mois sur les différentes plaines	91
Fig. 4.10 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PN, RDDI à l'échelle de 6 mois sur les différentes plaines	92

Fig. 4.11 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PN, RDDI à l'échelle de 9 mois sur les différentes plaines	93
Fig. 4.12 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PN, RDDI à l'échelle de 12 mois sur les différentes plaines	94
Fig. 4.13. Régression linéaire entres les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines d'Annaba et Batna période 1960-2014)	97
Fig. 4.14 Régression linéaire entres les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines de Hodna et Meskiana période 1960-2014)	98
Fig. 4.15 Régression linéaire entres les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines d'Outaya et Tébessa période 1960-2014)	99
Fig. 4.16 Corrélacion entre SPI et les différents indices à différentes échelles de temps (Exemple de la plaine d'Annaba)	100
Fig. 4.17 Corrélacion entre l'indice SPI et CZI, SPI et MCZI à l'échelle de temps 1, 3,6, 9 et 12 mois pour les sept plaines	100
Fig. 4.18 Carte de la zone d'étude découpée montrant l'utilisation des iso-lignes de l'indice d'aridité	111
Fig. 4.19 (a) Totale des précipitations annuelles ; (b) Variabilité spatiale de l'indice de concentration de précipitation; (c) Variabilité spatial de l'indice d'Aridité	112
Fig. 4.20 Variabilité temporelle de l'indice SPI et RDI pour trois échelles de temps (3,6 et 12 mois) à Zitouna avec un climat humide, Ain Berda Subhumide doux, Bordj Zemmorah, Subhumide sec, Batna semi-aride, et Biskra aride, pour la période de 1979-80 à 2013-14	114
Fig. 4.21 Diagrammes de dispersion entre SPI et RDI pour les 3 échelles de temps (3, 6 et 12 mois) à Zitouna, climat humide, Ain Berda, subhumide doux, Bordj Zemmorah, subhumide sec, Batna, semi-aride, et Biskra, climat aride, de 1979-80 à 2013-14	116

- Fig. 4.22** La distribution des deux composantes principales retenues après rotation par rapport au SPI-3 (a et g); SPI-6 (b et h); SPI-12 (c et i); RDI-3 (d et j); RDI-6 (e et k); RDI-12 (f et l) 121
- Fig. 4.23** Variabilité des scores CP rotatives de SPI et RDI pour les échelles de temps de 3, 6 et 12 mois pour la période 1980-2014 125
- Fig. 4.24** Nombre d'occurrences dans chaque catégorie sèche ou humide des scores CP de RDI et SPI l'échelle de temps de 3, 6 et 12 mois pour la période 1980-2014 127

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Liste des bassins hydrographiques de la région et leurs totales superficies	31
Tableau 3.1 Liste des stations pluviométriques retenues	41
Tableau 3.2 Liste des stations de chaque sous-groupe (S-G)	44
Tableau 3.3 L'application de comblement de lacune en utilisant la technique Bouche trous	45
Tableau 3.4 Les différentes anomalies rencontrées et leurs corrections	52
Tableau 3.5. L'utilisation des tests pour la détection des ruptures dans les séries	56
Tableau 3.6 Les classes des événements secs pour chaque indice	66
Tableau 3.7 Les différentes classes d'aridité (Razei et al. 2013)	69
Tableau 3.8 Classification de l'indice de concentration des précipitations ICP (Oliver 1980)	70
Tableau 4.1 Les caractéristiques des plaines d'étude et les surfaces d'influences de ses stations	85
Tableau 4.2 Les caractéristiques des stations fictives présent pour chacune des plaines	86
Tableau 4.3 Les caractéristiques des sécheresses qui ont touchées les sept plaines (SPI-12)	89
Tableau 4.4 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Automne) de la période 1960-2014	103
Tableau 4.5 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Hiver) de la période 1960-2014	104
Tableau 4.6 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Printemps) de la période 1960-2014	105
Tableau 4.7 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle Annuelle de la période 1960-2014	106
Tableau 4.8 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Automne) de la période 1960-2014	107
Tableau 4.9 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Hiver) de la période 1960-2014	108

Tableau 4.10 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Printemps) de la période 1960-2014	109
Tableau 4.11 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle Annuelle de la période 1960-2014	110
Tableau 4.12 Les évènements secs & humides en (%) dans chaque type de climat utilisant les indices SPI et RDI	118
Tableau 4.13 Le pourcentage des variances expliquées des composantes principales retenues après rotation	119
Tableau 4.14. L'analyse des tendances des scores de CP rotatifs relatives au RDI et SPI calculés sur des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois en utilisant le test de Mann-Kendal modifié et la magnitude des tendances en utilisant la pente de Sen pour la période 1979 - 80 à 2013-14	123
Tableau 4.15. L'analyse des tendances des scores de CP rotatives relatives au SPI calculés sur des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois en utilisant le test de Mann-Kendal modifié et la magnitude des tendances en utilisant la pente de Sen pour la période 1960-61 à 2013-14	124

ملخص

الجفاف عبارة عن ظاهرة طبيعية تسبب أضرار جسيمة للزراعة وللموارد المائية. الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة الجفاف ومحاولة التنبؤ ومعرفة خصائصه مستقبلا استنادا على معطيات وبيانات التساقط الخاصة بـ 123 محطة والتي تشمل مناطق في شمال شرق الجزائر للفترة الممتدة ما بين عامي 1960م إلى 2013م، إضافة إلى معطيات درجات الحرارة المستوفية للفترة ما بين عامي 1979م وإلى غاية 2013م. تمت المقارنة بين سبع مؤشرات للجفاف تعتمد على بيانات الهطول المطري كعامل وحيد، بحيث اتضح أن مؤشر SPI هو الأكثر كفاءة و استقرارا لدراسة الجفاف المتعلق بجميع أنواع المناخات وبمختلف المقاييس الزمنية. ولقد تم استخدام سلاسل التنبؤ الماركوفي - النموذج الرياضي الأول والثاني - وذلك لتقدير مختلف الاحتمالات الممكنة لحدوث الجفاف على مستوى سبعة مناطق سهلية بالنسبة للمقياس الزمني السنوي والموسمي اعتمادا على نتائج معطيات كل من SPI-12 و SPI-3. تبين أنه تفوق احتمالية وقوع حدثين جافين متتاليين في السهول الجنوبية خاصة في منطقة باتنة بحيث تصل إلى 68% على عكس سهول عنابة الواقعة في منطقة شبه رطبة بحيث تقدر نسبة حدوث هذه الحالة بـ 48% و كذلك على مستوى منطقة سطيف بنسبة لا تتجاوز 43%، وقد أثبتت الدراسة أيضا أن نتائج النموذج الثاني مشابهة إلى حد ما لنتائج النموذج الأول. كما تبين أنه لتحليل تغيرات سلوك الجفاف بطريقة أفضل وبشكل أدق استوجب استخدام مؤشرات جفاف تعتمد على معطيات إضافية أكثر من بيانات الهطول المطري كعامل وحيد، أين استخدم المؤشر RDI الذي يستند في حسابه على العلاقة بين نسبة الهطول المطري والتبخر النتحي الكامن إضافة لاستخدامه بالتوازي مع المؤشر SPI لكل من المقياس الزمني الخاص بـ 3، 6 و 12 شهر. وقد تم إسناد سلسلة متغيرات هذه المؤشرات إلى تحليل المكونات الرئيسية بنظام S-Mode مع Varimax، حيث تم الاحتفاظ بمكونين رئيسيين لكل المؤشرات. المكون الأول يمثل المنطقة الشمالية التي تتميز بمناخ رطب إلى شبه رطب بنسبة تفوق 40% إلى 43% لكل من SPI و RDI على التوالي، في ما يخص المكون الثاني تبلغ النسبة 27% و 28% ممثلا المنطقة الجنوبية والتي تتميز بمناخ شبه جاف إلى جاف. تم استخدام اختبار مان-كندال المعدل على نتائج المكونات الأساسية لكل من SPI و RDI للمقاييس الزمنية الثلاثة من أجل دراسة نمط تغيرات الجفاف عبر الزمن. بينت النتائج أن هذه الأنماط غالبا ما تكون غير معبرة عند حدوث انخفاض الجفاف، سواء بالنسبة لحدوث الجفاف وشدته في كلتا المنطقتين المحددتين وخلال مقاييس زمنية مختلفة.

كلمات البحث: التنبؤ بالجفاف، مؤشرات الجفاف، سلاسل ماركوف، تحليل المكونات الرئيسية، إختبار مان-كندال المعدل، التغير المناخي، شمال شرق الجزائر.

Abstract

Drought is a natural phenomenon with harmful effects on ecosystems and human related activities, mainly agriculture. The objective of this thesis is the analysis and prediction of drought in northeastern Algeria using monthly precipitation data of 123 rainfall stations from 1960 to 2013 and respective interpolated temperature data from 1979 to 2013. Seven indices of drought that use precipitation data as single input were compared; One was the Standardized Precipitation Index (SPI) which is more perform for all types of climate at various time scales. The Markovian forecasting models for the order I and II were used to estimate the different probabilities of drought appearance in the seven plains for both annual and seasonal time scales based on the results of the SPI-12 and SPI-3. The probability of having two successive dry events in the southern plains was higher particularly on Batna where it reached 68%, and contrarily to the plains of Annaba (48%) and Setif (43%) located in a sub-humid region, where the probability was smaller. The results of the order II process were similar to the order I. To better identify and analyze the behavior of drought, other indices that include other parameters than precipitation were used. The RDI index based on the ratio of precipitation to potential evapotranspiration was also used with SPI for the time scales of 3-, 6- and 12-months. Spatial and temporal patterns of droughts were obtained using Principal Component Analysis in S-Mode with Varimax rotation applied to both SPI and RDI. For all time scales of indices, two main components were retained; the first one identified the northern region characterized by a humid and moist sub-humid climate, and explained more than 40% and 43% of the drought spatial variability in SPI and RDI, respectively. The second component explained 27% and 28% for the same indices, representing the southern plains with arid and semi-arid climate. The Modified Mann-Kendall test was used to assess trends of the RPC scores, showing generally not significant trends for decreasing drought occurrence and severity in both identified drought sub-regions for all time scales.

Keywords: Drought forecasting, Drought Index, Markov Process, Principal Component Analysis, Modified Mann-Kendall test, Climate change, Northeastern Algeria.

Résumé

La sécheresse est un phénomène naturel avec des effets néfastes sur l'agriculture et les ressources en eau. L'objectif de cette thèse est l'analyse et la prévision de la sécheresse dans le nord-est Algérien en se basant sur les données mensuelles de précipitation de 123 stations pluviométriques couvrant la période 1960 à 2013 et des données de températures interpolées pour une période allant de 1979 à 2013. Sept indices de sécheresse prenant uniquement les précipitations comme données de base ont été comparés, il s'avère que l'indice SPI est le plus performant pour tous types de climat et pour les différentes échelles de temps. Le modèle de prévision Markovien d'ordre I et II a été utilisé pour estimer les différentes probabilités d'apparition des sécheresses au niveau de sept plaines à l'échelle annuelle et saisonnière tout en se basant sur les résultats des SPI-12 et SPI-3. Les plaines du sud ont une probabilité plus élevée d'avoir deux événements secs successifs, particulièrement celle de Batna qui atteint 68% contrairement à la plaine d'Annaba, située dans une région subhumide, où la probabilité est beaucoup moins importante (48%) et Sétif avec 43%. Les résultats pour le processus d'ordre II sont plus ou moins similaires à l'ordre I. L'utilisation des indices prenant en compte d'autres paramètres en plus de précipitation, s'avère nécessaire afin de mieux analyser le comportement de la sécheresse. L'indice RDI basé sur le rapport de précipitation et d'évapotranspiration potentielle été employé en parallèle avec le SPI à l'échelle de temps de 3, 6 et de 12 mois. Les séries de variables de ces indices ont été soumises à une Analyse en composantes principales en S-Mode avec rotation, deux composantes principales ont été retenues pour l'ensemble des indices. La première composante représente la zone nord caractérisée par un climat humide à subhumide et explique plus de 40% et 43% pour les indices SPI et RDI respectivement, tandis que la deuxième composante avec plus de 27% et 28%, représente la zone qui se trouve plus au sud avec un climat semi-aride à aride. Le test de Man-Kendall modifié a été employé sur les résultats des CP des indices SPI et RDI pour les trois échelles de temps afin d'étudier la tendance de la sécheresse à travers le temps. Les résultats montrent des tendances généralement non significatives pour la diminution de l'occurrence et de la sévérité de sécheresse dans les deux zones identifiées.

Mots clés : Prévision de sécheresse, Indice de sécheresse, Processus de Markov, Analyse en composants principales, Test de Man-Kendall modifié, Changement climatique. Nord-est Algérien.

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant, gloire à lui qu'il soit exalté de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver au bout de mon objectif.

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à toute ma famille
À mes très chers parents qu'Allah les préserve, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.
Je ne vous remercierai jamais assez pour tous ce que vous faites pour moi, merci pour votre
patience et votre dévouement;
À mes chers frères et sœurs Bilal, Roumaïssa, Noussaïba, Abdeslam, Abderrezak;
À ma chère fiancée Hadjer et sa famille;
Ce travail est aussi le vôtre.*

Je tiens à adresser un remerciement particulier à mon directeur de thèse le **Professeur MEDDI Mohamed** qui m'a accompagné durant ces années et m'a permis de progresser avec ses précieux conseils, sa disponibilité et ses orientations pour mener à bien ce travail. Toute ma gratitude Professeur Meddi.

Le remerciement suivant est adressé à mon co-directeur de thèse le **Professeur PEREIRA Luis Santos** de m'avoir accepté au sein de son groupe de recherche avec toute modestie malgré ses multiples charges et qui m'a permis d'atteindre mon objectif avec son aide très précieuse, ses orientations, ses remarques et sa disponibilité. "Muito obrigado Professor" pour tout et spécialement pour votre accueil très chaleureux durant mes stages à Lisbonne.

J'adresse mes sincères remerciements **aux membres du jury** qui vont examiner mon travail de thèse et sans doute contribuer à son enrichissement.

Je tiens à remercier aussi, Dr. Paula Paredes, Dr. Ana Paulo, Dr. Diogo Martins et Dr. Xavier Lecomte et docteur Hana Darouich pour leur accueil et leur entière collaboration durant mes stages à **ISA**.

Je remercie l'ensemble des **enseignants** de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique qui m'ont aidé d'une manière directe ou indirecte d'atteindre mon but particulièrement : Pr. Mihoubi, Dr. Meddi H, Dr. Ammari, Mr. Hebbouch.

Je remercie aussi toutes les institutions qui ont contribué à la réalisation de cette thèse : L'**École Nationale Supérieure d'Hydraulique** (ENSH) qui m'a surtout permis de bénéficier de deux stages à l'Institut Supérieur d'Agronomie ainsi qu'au laboratoire de Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE).

L'**Agence Nationale des Ressources Hydrauliques** (ANRH) de m'avoir fourni les données nécessaires pour mes travaux de recherches.

L'**Institut Supérieur d'Agronomie** (ISA) à Lisbonne (Portugal) qui m'a accepté de faire deux stages au sein de son laboratoire (LEAF) Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food.

Merci à tous mes enseignants du primaire jusqu'au troisième cycle universitaire et à toutes les personnes qui ont cru en moi et à l'aboutissement de ce modeste travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail
en signe de respect,
reconnaissance et de
remerciement*

À mes très chers parents

À mes frères et sœurs

À ma fiancée

*À toute ma famille et mes
amis*

Abdelaaziz.

Introduction générale

Introduction générale

Le climat de la terre varie depuis des millénaires selon les époques et les lieux, cependant, au cours des dernières décennies les changements climatiques semblent s'être accélérés, des scientifiques mettent en cause les modifications de l'atmosphère qui résultent de sa transformation chimique par les gaz à effet de serre (GES) avec d'autres phénomènes naturels à savoir l'activité solaire, cette perturbation de l'équilibre atmosphérique s'exprime par une augmentation des températures moyennes sur terre, engendrant de plus la fonte des glaces, une aggravation de la fréquence des événements extrêmes, les tornades, les inondations et plus encore les sécheresses.

En effet après les conclusions faites par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans ces rapports, pointant du doigt l'effet humain parmi les causes principales du réchauffement observé depuis le milieu du vingtième siècle et alertent le monde de ces impacts les plus dévastateurs à savoir ; moins d'eau pour l'agriculture engendrant l'insécurité alimentaire particulièrement au Sud, donc davantage de pauvreté ; plus de conflits et d'instabilité dans le monde (la guerre de l'eau, l'immigration climatique) ; plus de problèmes sanitaires et des risques accrus d'extinctions de plusieurs espèces ; augmentation et aggravation des fréquences de phénomènes d'inondations et d'érosions et de sécheresses, ce qui semble plus extraordinairement apocalyptique. Par conséquent, les populations s'alarment et s'interrogent sur la réalité de ces impacts sur les écosystèmes et le monde socio-économique, ce qui stimule l'interdisciplinarité et les collaborations entre scientifiques et chercheurs afin de comprendre, le plus finement possible, ce phénomène complexe pour faire en sorte de minimiser ces dégâts.

Les sécheresses parmi d'autres phénomènes liés de près aux changements climatiques, touchent de plus en plus les quatre coins du globe. Elle peut être définie comme un déséquilibre naturel mais temporaire de la disponibilité de l'eau, consiste à une précipitation persistante inférieure à la normale, difficile à prévoir, entraînant une diminution de la disponibilité des ressources en eau (Pereira et al. 2009). Les dégâts de cette catastrophe naturelle sont les plus coûteux au monde et affectent plus de personnes que d'autres formes de catastrophes (Keyantash et Dracup, 2002).

Les événements de sécheresse principalement en Afrique se multiplient et prennent des proportions très inquiétantes avec l'augmentation des superficies des zones arides (Dai 2011) causant plus de pauvreté et de famine. L'Algérie n'a pas été épargnée par ce phénomène, notamment avec l'augmentation de la densité de population ce qui a mené à un accroissement

spectaculaire de la demande en eau dans tous les secteurs, la ressource en eau est devenue plus que par le passé, une denrée économique rare. Malheureusement, cette pénurie d'eau n'implique pas de facto la fin du gaspillage : le taux de perte dans les réseaux est important, l'agriculture utilise mal l'eau qui est apportée à grands frais, la pollution sous toutes ses formes est dans une posture ascendante. On se comporte encore souvent comme si l'eau n'avait pas de prix (Touati 2010). Afin de remédier à ces problèmes, il est indispensable d'avoir le maximum de rigueur et surtout d'informations pour une meilleure gestion des ressources en eau, pour cela des études multidisciplinaires ont été lancées pour tenter d'apporter le plus de réponses et de solutions possibles et être par la suite un appui pour les services concernés.

Plusieurs études sur la sécheresse ont été entreprises à travers son impact sur les ressources en eau et le rendement agricole, d'autres se sont focalisées sur l'analyse et la compréhension du phénomène qui devient plus souvent une catastrophe démolisseuse pour tenter d'apporter une connaissance approfondie et une prévision estimatives, cela pour but de mieux gérer ses effets néfastes et ses multiples dégâts. Tout à fait, des indices ont été développés et utilisés pour identifier et analyser de manière appropriée les sécheresses et ses caractéristiques ; fréquence, durée, sévérité et étendue (Vicente-Serrano et al. 2010 ; Keyantash et Dracup, 2002 ; Paulo et Pereira, 2006 ; Mishra et Singh, 2010 ; Zargar et al. 2011). Ces multiples indices peuvent être employés dans la prévision de sécheresse et l'évaluation des impacts du changement climatique.

Dans le même ordre d'idées, de nombreuses études se sont concentrées sur les sécheresses en Méditerranée. Basé sur une étude à l'échelle mondiale, Spinoni et al. (2014) ont signalé une augmentation significative de la fréquence, de la durée et de la sévérité de la sécheresse dans la région. Une étude de Giorgi et Lionello (2008) sur les impacts du changement climatique dans le bassin Méditerranéen a noté une diminution évidente des précipitations associée à un réchauffement évident, principalement pendant la saison estivale. En outre, Giorgi et Lionello (2008) sont persuadés que la Méditerranée pourrait être une région très vulnérable aux changements globaux, par conséquent, il est probable que les sécheresses l'affecteront sévèrement.

Sousa et al. (2011) ont calculé l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (PDSI) et le PDSI auto-calibré (scPDSI) avec des données du vingtième siècle dans plusieurs endroits Méditerranéens et ont étudié les tendances à l'aide du test de Mann-Kendall modifié. Une tendance à des conditions sèches a été identifiée au cours du vingtième siècle dans la plupart des régions occidentales et centrales. Malgré l'ampleur de l'analyse, l'étude a permis de

détecter une tendance à la baisse pour le Nord-ouest d'Algérie, ce qui n'est pas évident pour la région Nord-est. Weiß et al. (2007) ont souligné que la sévérité de la sécheresse devrait augmenter beaucoup plus dans le Nord de la Méditerranée par rapport aux régions du sud. Hoerling et al. (2012), en utilisant les modèles de prédiction de changement climatique toujours pour le bassin Méditerranéen, ont également identifié une augmentation des conditions arides, principalement dans le Nord-est, influencé par l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO).

L'Algérie du Nord a été focalisée par diverses études de pluviométrie et/ou de sécheresse, cependant, la plupart ont été consacrées aux régions du Nord-ouest contrairement aux Nord-est où ce phénomène est moins exploré. Citons les études (Hamlaoui-Moulai et al. 2013 ; Meddi et al. 2010 ; Taibi et al. 2017 ; Zeroual et al. 2017) qui ont montré une diminution des totaux de précipitations dans le Nord-ouest de l'Algérie. Zeroual et al. (2017) ont également signalé un réchauffement amplifié. Zeroual et al. (2013) ont indiqué aussi une diminution remarquable des débits moyens mensuels au Nord de l'Algérie, ce qui est une conséquence directe de la baisse des précipitations. L'analyse spatiale en utilisant la technique de l'ACP, a montré que la longitude, la distance de la mer et la topographie, sont des facteurs importants influençant la variabilité des précipitations (Meddi et al. 2013) tout comme l'NAO ainsi que l'oscillation Méditerranéenne (Tramblay et al. 2013). Rajoutant à ces études celle de Taibi et al. (2013) qui a identifié six régions au Nord de l'Algérie, dont deux se trouvent dans l'Est Algérien, où une diminution des précipitations n'a pas été détectée. En général, il existe vraiment une connaissance suffisante de la variation des précipitations et des sécheresses dans le Nord-ouest de l'Algérie, contrairement à la partie Nord-est dont elle est moins explorée, ce qui justifie le choix de cette région du pays.

Afin d'arriver à tous ces résultats, plusieurs indices et outils ont été développé et utilisé pour bien identifier et analyser les caractéristiques de la sécheresse, à savoir l'indice de précipitations standardisé connu par SPI ; McKee et al. (1993), souple et flexible, il peut être employé à différentes échelles de temps et pour différents types de sécheresses (Mishra et Singh, 2010), c'est aussi l'indice le plus utilisé dans différentes études aux quatre coins du globe, à titre d'exemple : Afrique du Sud (Malherbe et al. 2016), Portugal (Paulo et Pereira, 2006), Iran (Akhtari et al, 2009), Inde (Goyal et Sharma 2016), Corée (Kim et al. 2009), Chine (Wu et al. 2001), Turquie (Dogan et al. 2012), Italie (Maccioni et al. 2014), États unies (Guttman, 1999) et le nombre ne cesse pas d'accroître (Hayes 2000) pour sa simplicité en exigeant uniquement les données de précipitations dans son calcul. Autres indices performants ayant cette même particularité sont utilisés dans la présente thèse, citons l'indice

des déciles (Gibbs et Maher 1967), l'indice de pourcentage à la normal (PNI) (Willeke et al. 1994), l'indice de China-Z index (CZI) et l'indice modifié de China-Z (MCZI) (Wu et al. 2001 ; Morid et al 2006), l'indice de Z-score ce dernier est souvent confus avec l'indice SPI (Hayes, 2000), l'indice efficace de sécheresse (EDI) (Byun et Wilhite 1999) développé à la base pour l'échelle journalière, néanmoins son principe peut être utilisé à l'échelle mensuelle (Smakhtin et hughes 2007, Morid et al. 2006).

L'utilisation de ces divers indices reste tout de même limitée et incomplète étant donné qu'ils prennent en considération uniquement les précipitations, Paulo et al. (2016) ont aussi mentionné que pour l'indice SPI la sélection de la période d'étalonnage est encore plus importante lorsqu'il s'agit des séries temporelles non stationnaires, probablement influencées par le changement climatique, pour y remédier et tenter d'approfondir l'analyse et la connaissance relative à la sécheresse l'indice de reconnaissance de sécheresse (RDI ; Tsakiris et al. 2007) est ajouté à l'ensemble des indices utilisés. L'indice RDI parmi d'autres prend en compte l'effet de la température et plus exactement l'évapotranspiration potentielle, il est considéré plus adéquat pour les études de sévérité de sécheresse sous l'effet de changements climatiques (Thomas et al. 2016) de plus il représente mieux le déficit du bilan hydrique par rapport aux indices basés seulement sur la précipitation (Tsakiris et Vangelis, 2005).

La prévision de la sécheresse est essentielle pour la mise en œuvre des stratégies appropriées en vue de réduire de son intensité et gérer ses impacts néfastes, par conséquent elle représente un outil efficace pour l'alerte précoce et la préparation à des éventuelles sécheresses. Divers modèles de prédiction de sécheresse ont été employés par plusieurs chercheurs, les modèles autorégressifs de moyennes mobiles (Mishra et Desai, 2005), les chaînes de Markov (Paulo et Pereira, 2007) les réseaux de neurones artificiels (ANN) (Mishra et al. 2007 ; Barros et Bowden, 2008 ; Cutore et al. 2009). Mishra et al. (2007) ont développé un modèle de prévision de sécheresse hybride combinant un modèle autorégressif des moyennes mobiles et un modèle de réseau neuronal artificiel, Rezaeianzadeh et. al (2016), ont utilisés dans un travail récent les réseaux de neurones artificiels en parallèle avec les chaînes de Markov. Dans la présente étude, le processus de Markov (Cinlar, 1975) d'ordre I et II à l'échelle saisonnière et annuelle a été employé sur sept plaines de Nord-est d'Algérie afin d'estimer les différentes probabilités d'apparition des sécheresses qui peuvent affecter la région, cela en se basant sur les résultats de SPI-3 et SPI-12.

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse s'avère importante dans le but de réaliser une analyse approfondie et avoir une meilleure connaissance sur la spatialisation de phénomène dans la région d'étude, caractérisée par différents types de

climat. Pour cela on a fait appel à la technique de l'analyse en composantes principales (ACP) qui est un outil performant très connu appliqué sur les indices de sécheresse dans différentes études préalables (ex : Bordi et al. 2009 ; Martins et al. 2012 ; Hamlaoui-Moulai et al. 2013 ; Raziei et al. 2015). L'analyse de tendance a été faite en se basant sur le test Mann-Kendall modifié (Mann 1945 ; Kendall 1975 ; Hamed et Rao 1998), pour déterminer l'importance d'une tendance dans une série temporelle, combiné avec l'estimateur de la pente du Sen afin d'estimer son l'ampleur. Les séries chronologiques traitées sont les résultats (scores) des composantes principales obtenues de chaque sous-région pour le SPI et le RDI calculé à différentes échelles de temps.

Ce projet de recherche va non seulement permettre d'étudier le phénomène de sécheresse dans cette région moins explorée, mais également avoir une connaissance approfondie sur sa variabilité spatio-temporelle sous l'effet du changement climatique. En effet, cette thèse permettra d'un côté d'estimer les éventuels événements de sécheresse qui peuvent apparaître pour mieux gérer les terres agricoles et contribuera à formuler des plans d'intervention par les services concernés notamment dans la gestion des ressources en eau et pour réduire la vulnérabilité face à cette catastrophe naturelle.

Chapitre 1

Revue de littérature

Introduction

Le climat mondial n'a jamais cessé de changer, la longue histoire de la terre est ponctuée par des périodes bien plus chaudes et bien plus froides que la nôtre. En effet, le climat a toujours évolué sans que l'humain n'y soit pour quelques choses, la tendance actuelle au réchauffement remonte à il y a au moins deux cents ans, elle suit une période très froide de l'histoire de la terre que les climatologues appellent ; petit âge de glace, mais avant, il y a eu lieu une période de douceur lors de laquelle les températures étaient plus chaudes qu'aujourd'hui, une période que les climatologues appellent ; Optimum Médiéval, en remontant encore le temps au-delà de Médiéval on découvre d'autres périodes chaudes d'une très longue durée ; l'âge de bronze et l'âge de pierre que les géologues appellent Optimum Climatique Holocène. Les températures étaient donc sensiblement supérieures à celles actuelles et cela durant trois millénaires, les variations climatiques de passer été de toute évidence naturelle. Cela veut dire qu'il existe des facteurs naturels régissant sur le changement de climat à travers le temps, rajoutant la tendance ascendante de l'effet désastreux de l'homme qui affecte le climat d'une manière non négligeable avec toutes les formes de pollution, l'émission des gaz à effet de serre, la déforestation, les pesticides...etc. À gros secouer le cocotier, on risque de prendre une noie sur la tête ! Si nous n'agissant pas nous pourrions attendre au pire.

La sécheresse, reconnue comme l'une des catastrophes naturelles liées de près au changement climatique, avec des impacts néfastes sur l'agriculture et les ressources en eau. Les sécheresses touchent plus de personnes que n'importe quelle autre catastrophe naturelle puisqu'elles surviennent à grande échelle et qu'elles ont un caractère persistant, c'est un phénomène complexe, ayant plusieurs types et comporte différentes caractéristiques, elle n'a donc pas une définition universelle. Le présent chapitre expose un aperçu général sur le climat et les différentes causes principales des changements climatiques et vise à citer les notions principales et les définitions des divers types de sécheresse et ses caractéristiques.

1.1. Les changements climatiques

1.1.1. Le climat un système complexe

La terre ne se réchauffe pas de manière homogène ou continue, que ce soit dans l'espace ou dans le temps en raison de la complexité du système climatique qui ne réagit pas de manière linéaire aux modifications qu'il subit.

En effet le système climatique comprend un ensemble d'éléments ; l'atmosphère, élément déjà complexe en soi, mais aussi les océans et l'ensemble la lithosphère (la croûte

terrestre) ; l'hydrosphère (l'ensemble des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau de la planète) ; la cryosphère (les glaces du monde entier, manteau neigeux) ; la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation).

L'atmosphère est par exemple en interaction avec les surfaces océaniques, dont la température dépend notamment de la circulation interne des courants marins dans toute la profondeur de l'océan. Cette température dépend aussi de la fonte des calottes polaires qui apporte une eau douce et froide dans l'océan, les glaces elle mêmes ont une action directe sur l'atmosphère dont elles dépendent également. Il en va de même pour la biosphère : si une surface terrestre est couverte de forêts ou au contraire désertique, son impact sur l'atmosphère sera différent. En effet sa rugosité ne sera pas la même et elle agira sur la vitesse du vent, l'humidité disponible variera de même que l'albédo (part du rayonnement solaire diffusé ou réfléchi directement sur la surface). Ainsi toute modification intervenant en un point d'un système aussi complexe peut mettre du temps avant d'entraîner une réaction après un certain délai la réaction peut alors être rapide en quelque sorte rattraper son retard par rapport à l'évènement qui en est la cause il peut aussi réagir brusquement après avoir absorbé des modifications sans rien en faire paraître (Rebetez 2011).

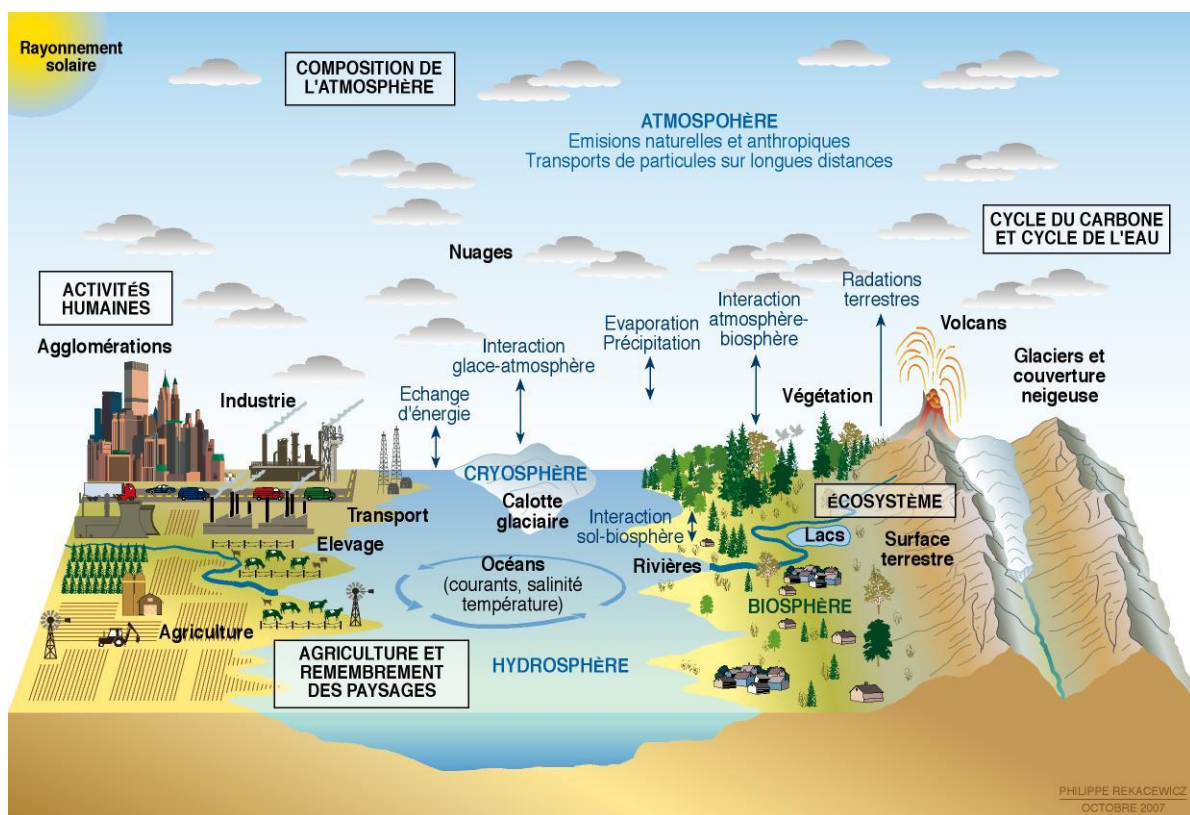


Fig.1.1 Différentes composantes du système climatique (Rekacewicz 2009)

Afin de comprendre et prédire l'évolution du climat d'une manière le plus finement possible, les scientifiques emploient des observations actuelles et historiques de différents phénomènes et de plusieurs paramètres à savoir les débits, les températures, les niveaux de la mer...etc., ces phénomènes forment un système interconnecté très complexe, dont l'observation permet de déterminer des modèles à partir desquels on peut élaborer des scénarios pour l'avenir du climat.

1.1.2. Les indicateurs de l'évolution climatique

Il existe bien plus d'indicateurs de l'évolution climatique qui baisse parfois et d'autres fois monte et dévoilent que le globe est vraiment en train de se réchauffer, à titre d'exemple ceux qui ont une tendance à la baisse ; la banquise arctique ou celle du Groenland et ceux qui ont une tendance à la hausse à savoir ; le niveau de la mer et des océans ou le plus connu la température globale de la terre.

1.1.2.1. L'augmentation de la température de surface sur la terre

En effet, la température de la terre ne cesse d'argumenter en enregistrant depuis 1870 une augmentation de $0,8 \pm 0,2$ °C, ce réchauffement est notablement différent est beaucoup plus important dans un hémisphère nord très industrialisé que l'hémisphère sud.

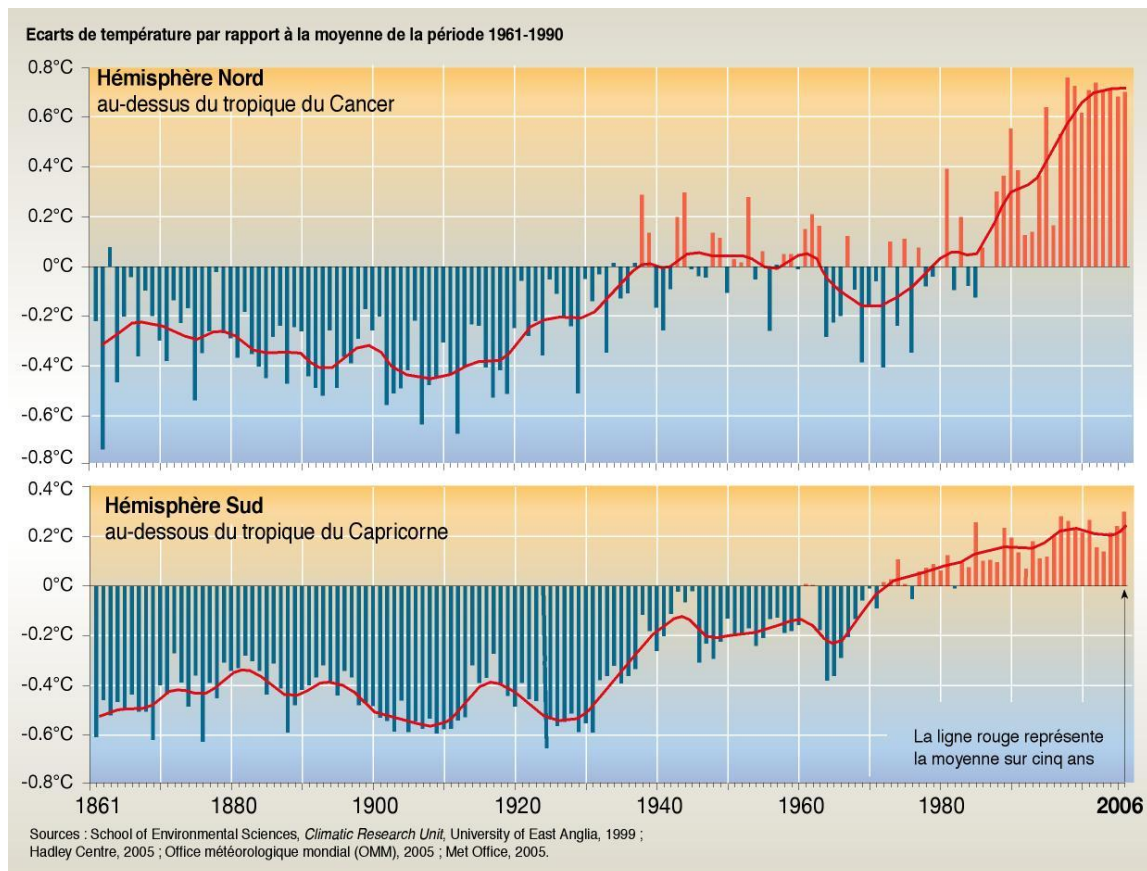


Fig.1.2 L'évolution des températures moyennes dans les deux hémisphères (Rekacewicz 2009)

Une variabilité entre continents est également observée, une forte modulation sur des périodes annuelles et multi décennales est également constatée, avec deux périodes de plus forte augmentation (approximativement de 1910 à 1940 et de 1975 à 2000) encadrées par des périodes de stagnation ou de décroissance. Les variations climatiques naturelles (El Niño, éruptions volcaniques, Oscillation Nord-Atlantique NAO) y sont visibles (Puget et al. 2010).

Il est évident que la terre est devenue plus que par le passé une planète très fragile, le climat a toujours évolué depuis des millénaires où il a été d'une grande instabilité, il a connu beaucoup de changements à l'échelle géologique à plusieurs reprises, le globe terrestre a pu se réchauffer de quelques degrés, ce qui est plutôt remarquable le plus récemment est l'enregistrement du mois d'août le plus chaud en 2016 et cela depuis 1880 où les climatologues ont constaté que c'est à ce moment que l'atmosphère a commencé légèrement de réchauffer.

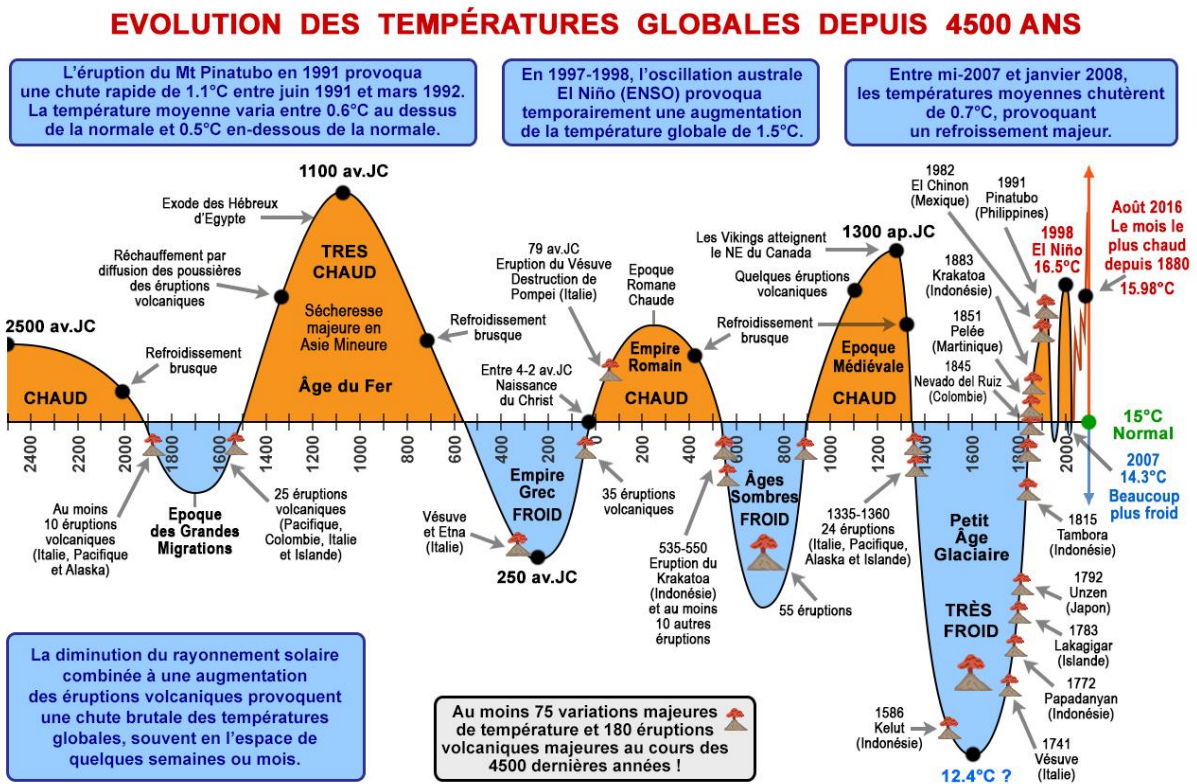


Fig 1.3 L'évolution des températures moyennes depuis 4500 ans (Lombry 2017)

1.1.2.2. La température et le niveau moyen des océans

Depuis 1950 à l'aide des bateaux de commerce ainsi actuellement les navires océanographiques (vers 700 m de profondeur) et plus récemment par le système de (bouées profilantes Argo), les chercheurs ont observé en mesurant les températures des Océanes une augmentation moyenne globale depuis quelques décennies. Le contenu d'énergie thermique

de l'océan a donc aussi augmenté, surtout depuis le début des années 1980. Ce réchauffement n'est pas uniforme. Il présente une importante variabilité régionale avec d'importantes oscillations pluriannuelles, voire décennales. Le niveau moyen des océans est aussi un autre indicateur qui intègre les effets de plusieurs composantes du système climatique. Avant 1992, il était mesuré par des marégraphes le long des côtes continentales et de quelques îles : le niveau des océans, en moyenne annuelle sur toute la planète, s'est élevé à un rythme de 0,7 mm/an entre 1870 et 1930 et d'environ 1,7 mm/an après 1930. Depuis 1992, les mesures sont effectuées par satellite : la hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an. À cette élévation moyenne se superposent des oscillations pluriannuelles, liées à la variabilité naturelle du système climatique. Depuis le début des années 1990, les contributions climatiques à cette élévation sont approximativement dues, pour un tiers à la dilatation de l'océan consécutive au réchauffement et, pour les deux autres tiers, aux glaces continentales à parts quasi égales, fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part et fonte des glaciers (Puget et al. 2010).

1.1.2.3. **La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques ainsi les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland**

La fonte rapide de la calotte glaciaire arctique diminuera les surfaces blanches et réfléchissantes, l'eau et la terre absorberont beaucoup plus de chaleur qu'elles n'en renverront dans l'atmosphère. La banquise, dont la fonte ne contribue pas à l'élévation du niveau des océans, est un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat : de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010. Tandis que les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland ont un bilan total de masse négatif depuis une dizaine d'années. Si quelques régions élevées de l'intérieur des calottes, en particulier Antarctique, s'épaississent un peu par suite de précipitations neigeuses accrues, la perte de masse domine. Celle-ci s'effectue dans les zones côtières du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest par écoulement très rapide de certains glaciers vers l'océan et décharge d'icebergs. On pense que le réchauffement des eaux océaniques dans ces régions est la cause majeure des instabilités dynamiques observées (Puget et al. 2010).

1.1.2.4. **Le Sahara**

Nous pouvons rajouter comme indicateur, l'assèchement progressif du Sahara, au cours des temps, depuis des millénaires le climat du Sahara a fluctué entre un régime chaud et sec et un régime doux et humide dont la vie en Sahara était plus agréable à la place de tout ce désert de sable, les géologues rapportent que jusqu'à l'Holocène le Sahara contenait au moins

15 grands lacs de plus de 100 km de longueur ; le lac Méga-Tchad au Tchad, Megafezzan en Lybie et le Méga lac Chotts en Tunisie, les variations climatiques ont eu un impact important et fatale sur toutes les formes de vie saharienne, les rivières et les lacs se sont asséchés se transformant en oueds puis en désert. les animaux se sont repliés vers les plaines puis les plateaux avant de disparaître et ne laissant aujourd'hui que quelques rares crocodiles dans les refuges que constituent les petits lacs de montagne et des poissons prisonniers dans les lacs perdus en plein désert comme ceux de Ubari en Lybie , la faune fut remplacée par des animaux adaptés au désert capables d'économiser l'eau et de se protéger des chaleurs comme le dromadaire, le fennec la gazelle, quelques reptiles et insecte y compris les arachnides comme les scorpions. Les hommes ont peuplé le Sahara durant des milliers d'année et ont laissé des peintures et des gravures rupestres témoignant que le climat permettait le développement d'une faune abondante d'herbivores et de carnivores ainsi d'oiseaux et de poissons, mais dès que la chaleur est devenue suffocante et que le sable a envahi leurs champs et asséché les points d'eau les hommes quittèrent leurs terres.

Aujourd'hui le climat de Sahara est tellement hostile que ses 2 millions d'habitants sont regroupés dans les seules régions où l'air est plus frais et l'eau disponible, il s'agit des régions montagneuses du Hoggar (Mali) Tassili (Algérie) et de l'Air (Niger) là où l'on retrouve de nombreuses peintures rupestre remontant à la fin du Néolithique, les populations ont également peuplé les oasis de Ghardaïa, Tamanrasset, et Souf en Algérie, Sebah Ghadamès, Mourzou et Koufra, région libyenne de Fezzan ainsi que Kattara et Baharieh en Égypte (Lombry 2017).

1.1.3. Les éléments réagissant sur le climat

La question que le public se pose le plus souvent, qu'elles sont les causes principales de ce réchauffement qu'on entend souvent dans les médias ? Et qui est devenu le sujet d'actualité le plus important. D'abord, il faut savoir qu'ils existent bien plusieurs facteurs qui contrôlent l'évolution du climat avec des degrés d'influences différentes, ces facteurs nous pouvons les distinguer en deux types ; naturels et anthropiques dû aux activités humains, les derniers rapports de synthèse de GIEC (2014) mettent en cause particulièrement l'influence de l'homme en se basant sur le fait que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont les plus élevées jamais observées.

1.1.3.1. Les fluctuations des paramètres orbitaux

La principale cause naturelle des changements climatiques sur terre réside dans les fluctuations de l'énergie solaire qui régit le climat terrestre jusqu'à notre ère, d'un côté le

soleil n'a pas toujours émis la même quantité d'énergie ainsi que la position de la terre varie par rapport à celle du soleil, ce qui mène la planète à recevoir plus ou moins d'énergie et à la voir répartie différemment, selon les saisons et les latitudes, les scientifiques distinguent trois paramètres orbitaux déterminant ces fluctuations de l'énergie solaire transmise à la terre ; l'excentricité orbitale, l'obliquité axiale et la précession des équinoxes (Rebetez 2011).

1.1.3.2. Les rayonnements solaires

On observe des changements autres que ceux affectant les paramètres orbitaux, comme les modifications intervenant dans la qualité d'énergie émise par le soleil ces modifications se mesurent à deux échelles bien différentes.

En premier lieu, sur plusieurs milliards d'années les scientifiques observent une augmentation très lente de l'énergie solaire. En effet y a un peu plus de 3 milliards d'années respectivement 2 milliards d'années, le soleil émettait environs 30 % respectivement 10 % d'énergie en moins qu'aujourd'hui. L'apparition de la végétation sur terre a entraîné une augmentation de l'oxygène et une diminution du dioxyde de carbone ce qui a permis à la terre de ne pas subir un réchauffement proportionnel à l'augmentation de l'énergie émise par le soleil. En second lieu, à très court terme, les cycles de tâches solaires entraînent à la fois des augmentations et des diminutions de l'énergie émise par le soleil, ceci par exemple sur des périodes d'environ 11 ans. Dans un délai si court, de telles modifications sont absorbées par le système climatique, surtout par les océans et elles ne se traduisent pas par des variations à long terme de la température du globe (Rebetez 2011).

1.1.3.3. L'activité volcanique

Les éruptions volcaniques majeures peuvent avoir une influence significative sur le climat sur des périodes s'étendant de quelques semaines à deux, voire trois ans l'éruption de Tambora en Indonésie 1815 a largement contribué à la vague de froid qui s'est abattue les mois suivants sur l'Amérique du Nord et l'Europe au point que l'année 1816 a été appelée l'année sans été. Des éruptions plus récentes, telle que le mont Chichon au Mexique 1982 et du Pinatubo aux philippines 1991 ont permis d'estimer leur influence globale sur le climat, nous pouvons citer aussi celui de l'Island qui a paralysé l'Europe entier en 2010.

L'impact climatique d'une éruption volcanique dépend d'un certain nombre de facteurs, en particulier de l'altitude à laquelle les aérosols sont émis dans l'atmosphère, du volume et continu de cendres et de gaz émis, plus les nuages et les aérosols sont élevés plus long sera l'effet de l'éruption sur le climat (Beniston 2009).

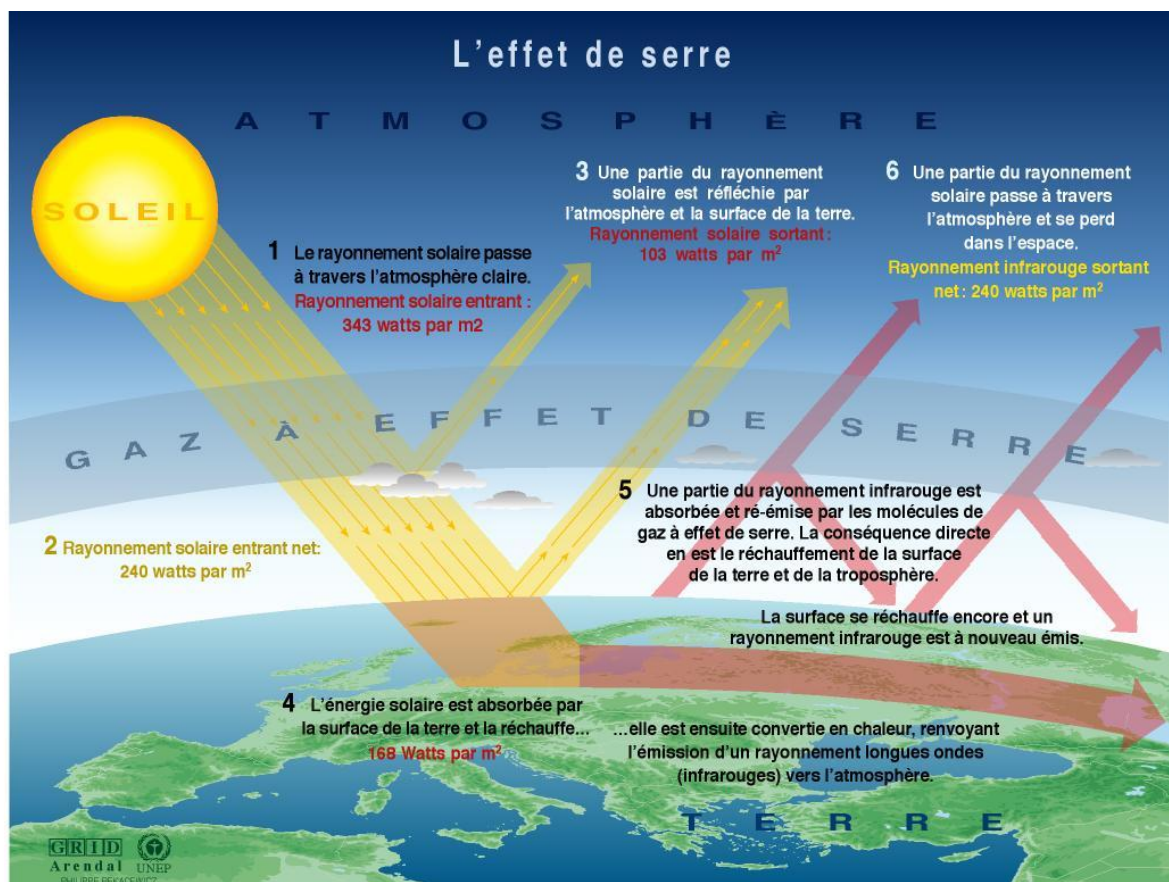
1.1.3.4. Les océans, véritable régulateurs thermiques

Les océans emmagasinent et restituent de grandes quantités d'énergie grâce à la circulation des eaux entre la surface et la profondeur, ce mécanisme permet d'absorber une grande part des changements climatiques. Intervenant dans des cycles relativement courts et ne parviennent cependant pas à compenser la totalité de l'énergie supplémentaire due aux rejets de gaz à effet de serre d'origine humaine.

A l'inverse, un changement dans la circulation océanique peut aussi être la cause de changement climatique en modifiant les échanges de chaleur avec l'atmosphère cela a déjà été le cas par le passé un réchauffement entraîne une fonte rapide d'une partie des calottes de glaces polaires et cet afflux d'eau froide et douce génère une perturbation importante de la circulation océanique (Rebetez 2011).

1.1.3.5. Les gaz à effet de serre (GES)

Comme la vapeur d'eau qui représente 98 % des gaz à effet de serre d'autres GES sont aussi naturellement présents dans l'atmosphère. Ces gaz forment une couche autour de la terre agissent comme le vitrage d'une serre en empêchant le rayonnement de passer et donc l'énergie de s'échapper, permettant de conserver sa chaleur : c'est l'effet de serre.



Sources : Okanagan university college Canada, section géographie ; université d'Oxford, section géographie ; Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), Washington ; Changements climatiques 1995 ; Données scientifiques sur les changements climatiques, Contribution du groupes de travail au deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, PNUE et OMM, Cambridge University Press, 1996.

Fig 1.4 L'effet de serre

En effet, le soleil réchauffe la Terre qui par la suite, réémet une partie de sa chaleur vers l'espace, les GES présents dans l'atmosphère emprisonnent une partie de cette chaleur, l'empêchant de retourner dans l'espace et permettent à la température terrestre d'être nettement plus élevés, les calculs ont montré que sans les gaz à effet de serre la température à la surface du globe serait en moyenne de -18°C , alors qu'elle atteint maintenant un peu plus de 15°C , ces gaz ne contribuent pas tous à l'effet de serre de façon équivalente, leur pouvoir de réchauffement global et leur durée de vie dans l'atmosphère sont différents (Puget et al. 2010). Les activités humaines, en particulier les transports, l'industrie et l'élevage, contribuent à augmenter le niveau des émissions de gaz à effet de serre ; le dioxyde de carbone CO_2 ; le méthane (CH_4) ; le protoxyde d'azote (N_2O)...etc. Ce processus se répète plusieurs fois et plus la concentration en gaz à effet de serre est importante, plus la terre et la troposphère se réchauffent.

1.1.4. Les impacts des changements climatiques

Les changements climatiques affectent de différentes façons l'environnement, la planète et les êtres humains qui l'habitent, citons les impacts :

1.1.4.1. Sur l'eau et les événements extrêmes

Le réchauffement climatique est le responsable de la fonte des glaces, dont le rythme s'est accéléré depuis les 15 dernières années, cela augmente la masse d'eau dans les océans et par conséquent avec l'expansion de l'eau, une élévation du niveau de la mer est imminente, les élévations prévues sont de 9 à 88 cm entre 1990 et 2100. Cette situation aura des conséquences néfastes sur les basses terres côtières où vit une très grande partie de la population mondiale. De plus, les ressources en eau potable seront affectées, l'augmentation des températures pourrait occasionner une baisse considérable du niveau d'eau de grands barrages et lacs, en raison d'une plus grande évaporation.

Les changements climatiques bouleversent déjà les facteurs régissant des précipitations. Ces bouleversements seront accompagnés d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes : sécheresses, inondations, canicules, pluies fortes et abondantes, tornades... Ces événements climatiques, souvent à l'origine de catastrophes, pourraient se produire plus fréquemment à l'avenir (Nature Québec 2011).

Au pays du Maghreb, une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations a été observée. Ainsi, on est passé d'une sécheresse tous les dix ans au début du siècle à cinq à six années de sécheresses en dix ans actuellement. Cette nouvelle situation est accentuée par la nature excessive des rares années humides avec une pluviométrie très forte et répartie sur une courte période de l'année : on voit ainsi des centaines de millimètres d'eau

tomber dans des régions arides en quelques jours et rien pour le reste de l'année. Un sol aride, une érosion forte, un ruissellement excessif, sont des caractéristiques de cette région qui favorisent des catastrophes naturelles en relation avec ces fortes précipitations et ces inondations (IISD 2003).

1.1.4.2. Impacts sur le secteur agricole

L'avenir de la production agricole dépendra de plusieurs facteurs liés aux changements climatiques, tels que: la disponibilité des ressources en eau, la modification des températures, l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et la compétition entre les différents ravageurs (Rosenzweig et al. 2001 ; Parson et al. 2003). Des changements dans les rendements et la valeur nutritive des cultures sont prévus (Bertrand et al. 2007 ; Bertrand et al. 2008 ; Hatfield et al. 2011). De façon générale, l'augmentation des températures et l'intensité des événements climatiques extrêmes pourraient causer une diminution significative des rendements des cultures (Rosenzweig et al. 2001) mais l'impact des changements climatiques sur les rendements peut varier en fonction de chaque région. Une augmentation de la production est prévue dans les zones qui se trouvent sous les latitudes moyennes et élevées, alors qu'on s'attend à une diminution dans les zones tropicales et subtropicales (Parry 2007). La réponse des cultures aux changements prévus de température, de concentration en CO₂ et de précipitations va différer non seulement en fonction de la localisation géographique mais aussi selon les espèces cultivées (Brassard et Singh, 2008 ; Hatfield et al. 2011). Hatfield et al. (2011) mentionnent qu'il existe des conditions optimales de températures minimales ou maximales pour assurer la croissance de chaque espèce de plantes. Sous des températures plus élevées, les plantes peuvent se développer plus rapidement. Toutefois, dans ces conditions, leur cycle de vie est plus court, ce qui signifie que les plantes de petite taille ont une phase de reproduction raccourcie. Par conséquent, une augmentation de la température de croissance ne se traduit pas nécessairement par une augmentation de la production (Hatfield et al. 2011). Quand les températures sont supérieures à celles considérées comme optimales, la croissance diminue. Pour cette raison, on constate que l'effet de la température sur les rendements n'est pas linéaire (Schlenker et Roberts 2009). En général, les tendances climatiques globales peuvent réduire les rendements des cultures. Cependant, cela n'exclut pas que, dans certaines régions, les rendements peuvent au contraire augmenter à cause des variations climatiques (Lobell et Field, 2007), comme dans le cas de la carte ci-après qui résume l'exemple de l'évolution prévue de la production céréalière entre 2000 et 2080, elle montre que l'Algérie est beaucoup

plus menacée dans la région Nord-ouest ainsi que la région Sud de la partie Nord-est du pays (Prado 2015).

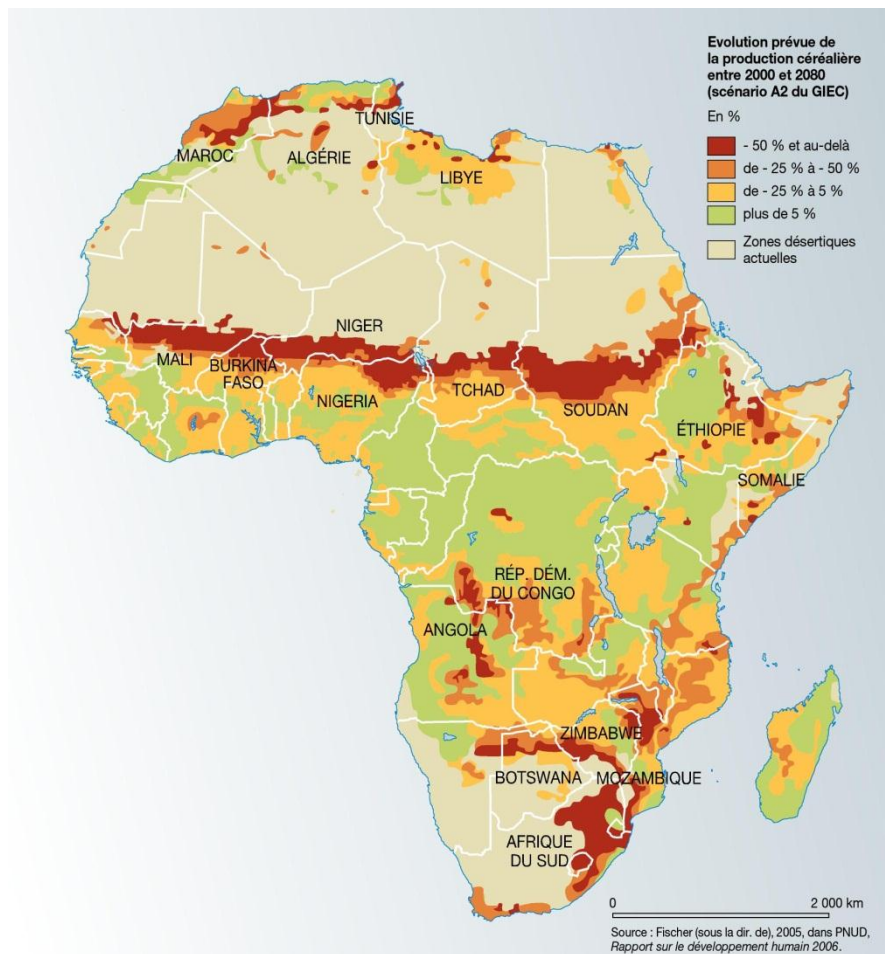


Fig. 1.5 Évolution prévue en Afrique de la production céréalières entre 2000 et 2080 scénario A2 du GIEC

La question qui se pose est à propos de l'adaptation de l'agriculture aux nouvelles conditions liées aux changements climatiques. Beaucoup de défis attendent les producteurs, mais ceux-ci ont la possibilité de s'adapter aux changements climatiques en introduisant de nouvelles variétés de cultures ou de nouveaux types de productions, en assurant une meilleure protection des sols et de meilleures conditions hydriques. Plus vite les producteurs agricoles sauront s'adapter aux changements climatiques, plus ils en réduiront les impacts négatifs sur leur exploitation. En effet, les actions de lutte aux changements climatiques réalisées maintenant sont plus avantageuses que les adaptations nécessaires qui seront imposées par les impacts (Nature Québec 2011).

1.1.4.3. La catastrophe climatique en Algérie en novembre 2001

L'Algérie a connu la plus terrible inondation de son histoire du 10 au 14 novembre 2001. Frappant principalement la capitale Alger, ce drame où plutôt cet événement

météorologique extrême a laissé 751 victimes dont plus de 700 à Alger et occasionne des dégâts estimés à 300 millions USD. Le nombre de personnes déplacées sont de 24 000 et plus de 2 700 habitations sévèrement endommagées. Entre 40 000 et 50 000 personnes ont perdu leurs habitations et près de 109 routes endommagées. Seize autres départements seront affectés à un degré moindre par ce phénomène d'une rare violence durant lequel Alger enregistrera en quelques heures l'équivalent de la pluie totale mensuelle. Les vents atteindront 120 km/h. Le phénomène avait fait l'objet d'une prévision des services météorologiques algériens et étrangers, mais l'ampleur des dégâts humains et matériels est certainement en relation avec la violence d'un phénomène classé comme l'un des plus sévères de ces 40 dernières années (IISD 2003).

1.1.4.4. L'exode climatique, les feux de forêts entre autres

Les impacts de changements climatiques touchent la planète sur tous les plans et les différents secteurs de près et de loin, directement et indirectement, à l'image de plus de 32 millions de personnes qui ont été contraintes à l'exode climatique en 2012. Les désastres reliés au climat auraient causé le déplacement de 32.4 millions de personnes dans 82 pays, d'après le rapport "Global Estimates 2010" publié, lundi 13 mai, par l'International Displacement Monitoring Centre (IDMC) et le Norwegian Refugee Council (NRC). L'Asie a été la plus affectée (22,2 millions de déplacés), devant l'Afrique (8,2 millions) et le continent américain (1,8 million) (Le monde 2013), citons aussi d'autres impacts lié de près aux changements climatiques à savoir les cyclones, les tempêtes, l'enneigement, les vagues de chaleur qui résultent les feux de forêts, dont l'Algérie n'a pas été épargnée et a été affectée très récemment spécialement la région Nord-est le mois d'aout 2017.

1.2. La sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel, à caractère régional, elle touche le monde entier, ses caractéristiques varient d'un régime climatique à un autre, elle se produit aussi bien dans des zones à forte précipitations que dans celles à faibles précipitations, elle constitue un événement climatique extrême, souvent difficile de savoir quand elle commence et d'établir quand elle termine. Elle s'aggrave d'un pays à un autre, selon leurs potentialités naturelles et le niveau de développement (OMM 2006).

Toutes les régions du monde ont été touchées entre 2001 et 2010 par des sécheresses persistantes et particulièrement dévastatrices mentionnons celles qui ont affecté l'Australie (notamment en 2002), l'Afrique de l'Est (en 2004 et 2005, entraînant des pertes en vies

humaines et des pénuries alimentaires à grande échelle) et le bassin de l'Amazone (en 2010) (OMM 2013).

L'Algérie également a connu au cours de ces vingt dernières années, une sécheresse intense et persistante caractérisée par un important déficit pluviométrique (Medejerab et Henia 2011).

1.2.1. Définition de la sécheresse

Le terme général de "sécheresse" recouvre des notions différentes. En premier lieu, dans sa définition générale elle est évidemment toujours liée à un déficit de la pluviométrie. Toutefois, lorsque ce déficit est systématique, on parle dans ce cas d'aridité. Hors de ces zones désertiques ou arides, la sécheresse est plutôt ressentie comme un épisode et classée par les climatologues dans la catégorie des événements extrêmes. Elle se définira alors par l'intensité de sa déviation par rapport aux valeurs moyennes ou normales de pluviométrie, avec des éléments quantitatifs sur sa durée, sa période d'occurrence et son extension géographique (INRA 2006).

La sécheresse peut être définie comme un déséquilibre naturel mais temporaire de la disponibilité de l'eau, consiste à une précipitation persistante inférieure à la normale, difficile à prévoir, entraînant une diminution de la disponibilité des ressources en eau (Pereira 2009). Elle commence par une diminution du taux d'humidité du sol, puis affecte les réserves des eaux de surface et ensuite elle atteint les eaux souterraines et la nappe phréatique. En période de sécheresse la croissance des plantes ralentit, les lacs se dessèchent, faut aussi restreindre la consommation à des fins domestiques, municipales, agricoles et industrielles. Une sécheresse perturbe momentanément l'écosystème et favorise la propagation de certains insectes nuisibles et de maladies chez les végétaux et les animaux (Hamadene 2011).

1.2.2. Types de sécheresse

La sécheresse, notion toute relative, se manifeste de plusieurs façons : sécheresse météorologique, sécheresse hydrologique, sécheresse agronomique et sécheresse édaphique.

1.2.2.1. Sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique se caractérise par une absence prolongée ou un déficit marqué en eau par rapport à la normale. Ces types de sécheresse (Météorologique, agricole, hydrologique, édaphique) peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'élément moteur des autres.

Elle se caractérise par une réduction ou une mauvaise répartition, voir une absence des pluies dans une région donnée pendant une période de temps. La sécheresse météorologique est un phénomène climatique plutôt qu'un aléa proprement dit, mais on la confond souvent

avec d'autres conditions climatiques auxquelles elle s'apparente, notamment l'aridité. Elle ne devient dangereuse que lorsqu'elle se transforme en sécheresse agricole ou hydrologique, qui dépend d'autres facteurs dont le seul manque de précipitations (Jouilil et al. 2013).

1.2.2.2. Sécheresse agronomique ou agricole

La sécheresse agricole est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduit significativement les productions agricoles par rapport à la normale où les valeurs attendues pour une région de grande étendue (Khaldi 2005). Une définition plus précise de ce type de sécheresse ; quand les quantités d'eaux évaporées par les plantes et les cultures et l'évaporation normale dépassent les apports pluviométriques. Une année sera caractérisée par des mois secs et des mois pendant lesquels les réserves en eau se reconstituent. Si le nombre de mois secs consécutifs est trop important on constatera des états de stress de la végétation naturelle et des cultures : on sera alors dans une situation de sécheresse (Charreton 2009).

1.2.2.3. Sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est caractérisée par une baisse du débit des cours d'eau, du niveau de remplissage des barrages, de la recharge des nappes phréatiques (Charreton, 2009) accompagnée d'une évaporation massive, ainsi que les opérations d'irrigation sont compromises suite à l'affaiblissement prolongé des apports pluviométriques au niveau des bassins versants. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet. Ce type influence la production agricole indirectement par la disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

On est amené à distinguer aussi

La sécheresse du type socioéconomique, diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (eau, fourrage pour le bétail, énergie hydroélectrique, etc.) qui sont tributaires des précipitations. L'offre varie annuellement en fonction des précipitations ou de l'eau disponible ; la demande varie également et souvent associée à une évolution positive due par exemple, à une augmentation de la population, au développement ou à d'autres facteurs (OMM 2006).

La sécheresse Édaphique, causée par une insuffisance de l'eau dans le réservoir superficiel du sol pendant la saison de culture. C'est la sécheresse classique en agriculture, joue directement sur la production agricole.

Ces sécheresses se différencient par leur intensité, leur dynamique de mise en place (brutale ou progressive), leur durée (sécheresse intermittente ou prolongée) et leur époque d'apparition par rapport au cycle cultural (INRA 2006).

1.2.3. Caractérisation de la sécheresse

La sécheresse est un phénomène pouvant être caractérisée par sa **sévérité** ou son **intensité**, sa **durée**, et son **étendue géographique**.

1.2.3.1. L'intensité

On parle de l'ampleur du déficit de précipitations et la gravité des conséquences de ce déficit. L'intensité est généralement mesurée par l'écart par rapport à la normale d'un paramètre climatique tel que la hauteur de précipitation, d'un indicateur tel que le niveau des réservoirs ou d'un indice tel que l'indice de précipitation standardisé (OMM 2006).

1.2.3.2. La durée

La durée est le deuxième trait essentiel de la sécheresse. Si une sécheresse peut débiter rapidement sous certains régimes climatiques, il lui faut généralement deux à trois mois au moins pour s'installer; elle peut ensuite persister pendant des mois ou des années. L'ampleur des effets de la sécheresse est étroitement liée au moment où débute la pénurie de précipitations, à l'intensité de celle-ci et à la durée du phénomène (OMM 2006).

Nous pouvons détailler encore plus sur les caractéristiques de la sécheresse dans le schéma ci-après en prenant l'exemple de l'utilisation de l'indice SPI-12 pour l'évaluation de phénomène dans la région d'Annaba.

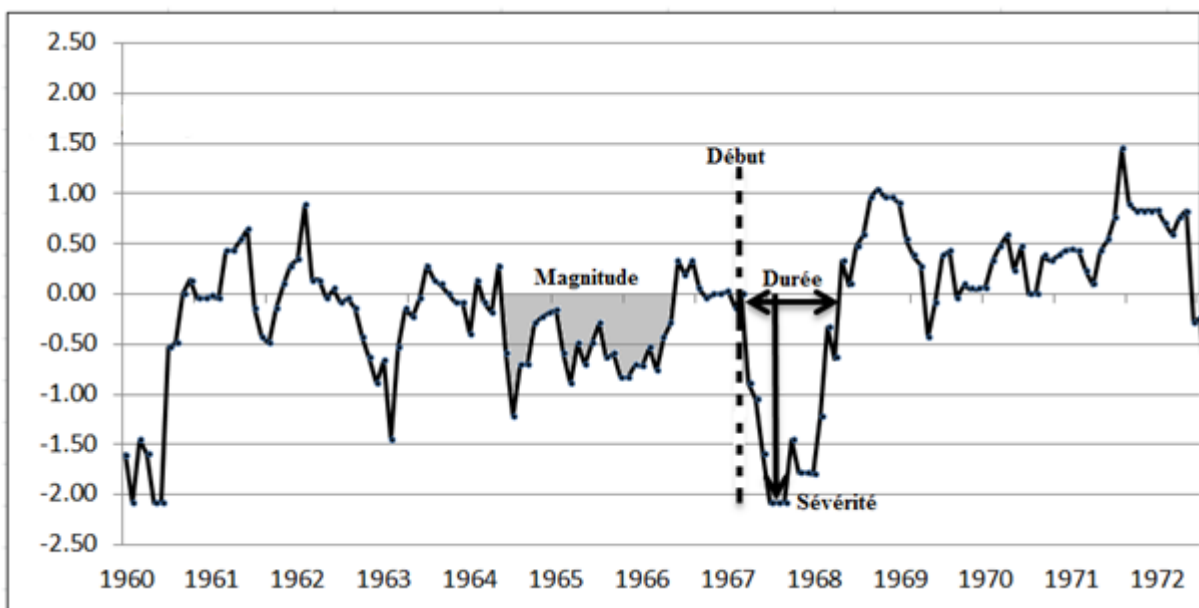


Fig 1.6 Les caractéristiques de la sécheresse, exemple en utilisant l'indice SPI-12 sur la région d'Annaba période 1960-1972.

1.2.3.3.L'étendue spatiale

Les sécheresses diffèrent aussi par leurs caractéristiques spatiales c'est-à-dire la surface touchée par la sécheresse. Dans les pays de grande superficie (Brésil, Chine, Inde, États-Unis, Australie, etc.) la sécheresse touche rarement, voire jamais, le pays entier. En 1934, lors de la pire sécheresse qu'eurent à subir les États-Unis plusieurs années durant, seulement 65 % du territoire américain furent touchés par une sécheresse intense ou extrême cela a été l'étendue spatiale maximale de la sécheresse dans ce pays pendant la période 1895-2005 (OMM 2006).

1.2.4. Études antérieures sur la sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel ayant des effets néfastes sur les écosystèmes et les activités humaines, principalement l'agriculture. Étant donné que la demande en eau augmente dans divers secteurs économiques et que les impacts du changement climatique aggravent la pénurie d'eau, la compréhension de la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse devient plus qu'importante particulièrement pour les pays très exposés à la sécheresse (Tsakiris 2017).

Plusieurs études sur la sécheresse ont été élaborées, la présente se focalise sur la partie Nord-est de l'Algérie qui est affectée par la sécheresse comme la majeure partie de la région méditerranéenne. Giorgi et Lionello (2008) ont identifié la Méditerranée comme une zone critique en termes de changement climatique. Sousa et al. (2011) utilisant le test de Mann-Kendall modifié (Yue et Wang 2004), ont trouvé des tendances significatives indiquant des conditions plus sèches dans la plupart des régions méditerranéennes occidentales et centrales. Sousa et al. (2011) et Hoerling et al. (2012) ont montré que les précipitations dans la région, principalement en hiver, sont affectées par l'oscillation nord-atlantique (ONA). Des études basées sur des séries reconstituées de l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (PDSI, Palmer 1965) ont montré que les changements dans la variabilité multi-décennale du PDSI sont plus prononcés en Méditerranée occidentale (Touchan et al. 2011). Les changements conduisant à des climats plus secs auront de grands impacts significatifs sur l'agriculture, en particulier dans les cultures pluviales comme les oliviers et le blé, qui seront plus dépendants de l'irrigation à l'avenir (Tanasijevic et al. 2014 ; Saadi et al. 2015).

L'étude de comparaison des deux indices de sécheresses (SPI, McKee et al. 1993) et (RDI Tsakiris et al. 2007) est recommandée pour voir leurs performances de détecter les événements de sécheresse et puisque le premier qui est un indice flexible connu par sa simplicité utilise seulement les précipitations tandis que le deuxième se calcule en se basant sur le ratio des précipitations et d'évapotranspirations potentielles mensuelles. La comparaison entre ces deux indices à l'échelle locale a montré qu'ils sont assez similaires

pour identifier le degré de sévérité ainsi les événements secs et humides (Shokoohi et Morovati 2015 ; Zarch et al. 2015 ; Merabti et al. 2017a). Une conclusion importante dans cette étude montre que le RDI se comporte de manières plus uniformes que le SPI pour différents climats et différentes échelles de temps, probablement en raison de la combinaison de l'ETP dans l'indice.

Divers chercheurs ont utilisé l'indice RDI pour l'analyse régionale et la détection des tendances. Kanellou et al. (2012) ont appliqué l'analyse en composantes principales et les grappes sur des séries chronologiques de RDI et ont identifié cinq régions distinctes en Grèce. Kousari et al. (2014) et Zarei et al. (2016a, b) ont utilisé avec succès le RDI pour évaluer la sévérité de la sécheresse et pour l'analyse spatiale et celle des tendances de sécheresse dans les régions arides et semi-arides de l'Iran. Xu et al. (2015) ont analysé les variations spatiales et temporelles de la sécheresse en Chine et ont trouvé des résultats cohérents entre SPI-3 et RDI-3 sauf pour la période où une tendance à la baisse du ETP a été enregistré dans les régions non arides de Chine. Bien que les études des tendances et les analyses spatiales de sécheresse utilisant SPI soient nombreuses (Vicente-Serrano 2006 ; Bordi et al. 2009 ; Santos et al. 2010 ; Raziei et al. 2015), seules quelques-unes font référence à des applications dans le Nord de l'Algérie (Taibi et Souag 2011 ; Lazri et al. 2015).

En utilisant des données d'anneaux d'arbres, Nicault et al. (2008) ont reconstitué les valeurs PDSI pour 500 ans dans le bassin Méditerranéen, les résultats ont mis en évidence des variations PDSI multi-décennale dans les parties centrales et occidentales de la Méditerranée, mais des changements de fréquence moins clairs à l'Est. Le 16ème et la première partie du 17ème siècle ont été marqués par des épisodes secs à l'Ouest similaires à ceux observés à la fin du 20ème siècle. Par rapport à la partie orientale de la Méditerranée, la forte sécheresse observée à la fin du dernier siècle était considérée comme la plus forte des 500 dernières années. Touchan et al. (2008) ont également reconstitué une longue série de PDSI (1456-2002) en se concentrant sur le Nord-ouest de l'Afrique et ont trouvé des résultats en parfait accord avec ceux rapportés auparavant. De plus, ces auteurs considèrent qu'une transition vers des conditions plus arides se développe, également en accord avec les prévisions des modèles de circulation générale. Leurs résultats ont été confirmés par une deuxième étude (Touchan et al. 2011) où la reconstruction s'est déroulée à 1179 sur les pays du Maghreb, ce qui a montré une évolution vers des conditions plus sèches. En accord avec les études mentionnées ci-dessus, Saadi et al. (2015) ont rapporté des changements prévus dans les précipitations, la température, dans le bassin méditerranéen et prédisaient des impacts importants sur les cultures de blé, une culture pluviale typique qui a probablement besoin d'évapotranspiration.

Conclusion

Historiquement, peu d'attention était accordée à l'étude de sécheresse dans la région Nord-est du pays et principalement à l'aspect prédiction qui est indispensable pour la gestion, la préparation et à l'alerte précoce contre ce phénomène dévastateur. En effet, la connaissance approfondie sur le comportement de sécheresse peut nous renseigner sur la manière d'agir pour minimiser ses effets néfastes sur tous les secteurs, en prenant ainsi en considération comme appui les perceptions actuelles sur la variabilité spatiale et temporelle de sécheresse dans le bassin Méditerranéen et les différentes stratégies qui peuvent exister.

Plusieurs applications en liens étroits avec la sécheresse seront employées dans cette étude pour but de tenter d'apporter le plus de réponses possible sur cet évènement. Ces applications s'appuient principalement sur un ensemble de données de précipitations et de températures d'une zone géographique très vaste connu par ses plaines fertiles. Des indicateurs de sécheresse seront comme appui majeur pour faciliter l'évaluation et le suivi. Les principaux objectifs de cette thèse consistent à :

Étudier et à analyser la sécheresse en utilisant plusieurs indices particulièrement SPI ; lancer une étude comparative entre les indices à différentes échelles de temps afin d'avoir les limites et les performances de chaque indice ; utiliser le modèle Markovien pour but de prédire et connaître les régions vulnérables et les plus affectées par la sécheresse ; caractériser la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse au Nord-est de l'Algérie en se basant principalement sur les deux indices SPI et RDI pour différentes échelles de temps ; utiliser les résultats de l'étude spatiale et régionale pour lancer une étude de tendance et puis une comparaison entre les deux indices précités à l'échelle régionale.

Chapitre 2

Cadre d'étude

Introduction

Le passage par la présentation de la zone d'étude est indisponible pour avoir un aperçu global et une connaissance suffisante sur la situation de milieu naturel de point de vue géographique particulièrement et sur ses caractéristiques physiques, à savoir le relief ou même le climat, notamment quand on sait que ces derniers ont un impact direct sur le phénomène étudié.

La présente thèse comporte deux parties bien distinctes, la première étudie le phénomène de sécheresse essentiellement au niveau de sept plaines les plus étendues de la région, cette partie prend en considération la totalité de superficie avec les huit (8) bassins hydrographiques qui composent la région, tandis que la deuxième se concentre uniquement sur la zone qui contient les données nécessaires.

Il sera donc question dans ce chapitre de présenter la localisation géographique de la région d'étude et de traiter d'une façon générale ses caractéristiques physiques morphologies et climatiques.

2.1. Localisation de la zone d'étude

Le Nord-est Algérien est une zone géographique très vaste, couvrant un totale de 150 181 Km² comprenant plusieurs plaines fertiles étendues.

En premier lieu l'étude prend en compte toute la superficie susmentionnée (Fig. 2.1), tandis qu'après avoir découpé la partie extrême Sud où il y a un manque de données, on s'est focalisé sur une superficie d'environ 109 000 Km² étalant entre les longitudes 8°40'10"E et 3°15'6"E et les latitudes 37°5'00"N et 34°32'30"N (Merabti et al. 2017a).

La zone est limitée au Nord par la mer méditerranéenne, cette région côtière reçoit le maximum de précipitation de tout le pays où le climat est humide à subhumide, vers l'intérieur des terres, on observe une diminution de précipitations (Merabti et al. 2017b) jusqu'à ce qu'elle atteigne le minimum, particulièrement dans les plaines du Sud caractérisées par un climat aride, la région est en effet connue par une diversité climatique très marquée.

La zone d'étude est en effet limitée de l'Est par les frontières tunisiennes, du Sud par une ligne parcourant Ouled Djellal, Negrine et la limite Sud de Chott Melrhir, de l'Ouest par une ligne verticale traversant les monts de la Kabylie, la limite Ouest de Chott el Hodna et les monts du Zab et du Nord bien évidemment par la mer Méditerranéenne.

La figure ci-après représente la situation géographique de la zone et le relief caractérisant les différentes plaines.

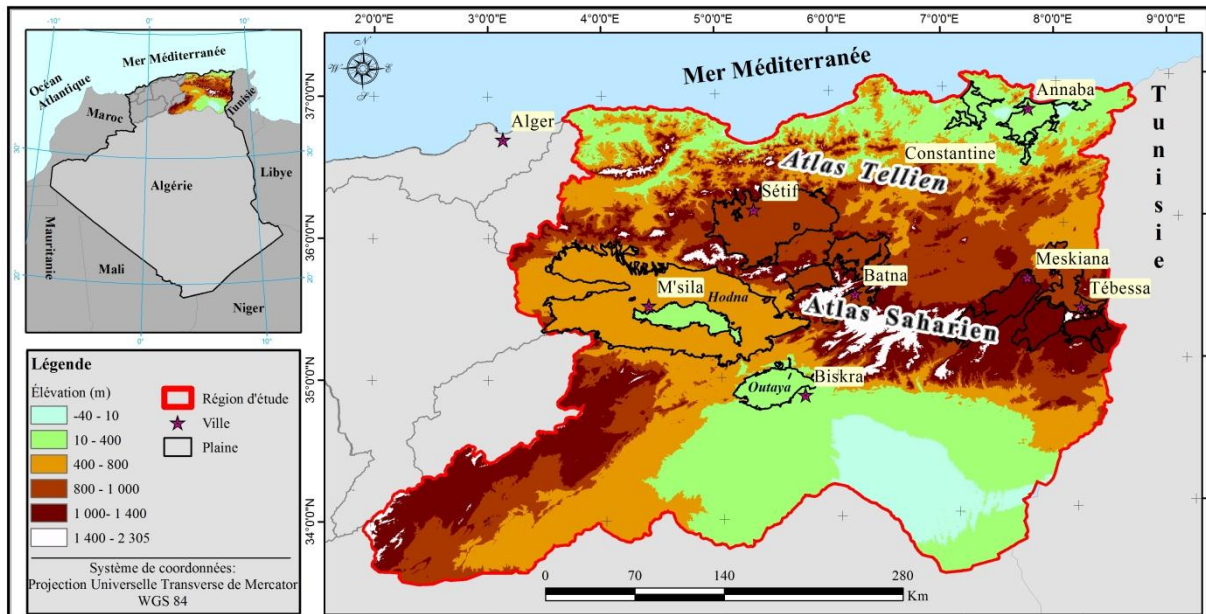


Fig. 2.1. Relief de la région d'étude caractérisant les différentes plaines

2.2. Le relief

Le Nord-est Algérien est un espace non uniforme caractérisé par sa structure hétérogène très poussée et un relief accidenté et diversifié, dont il dispose des zones élevées (tout ce qui est montagnes et crêtes) et des zones basses à savoir les plaines et les bassins, schématiquement apparaissent sous forme de trois grands ensembles :

Le système tellien est une chaîne plissée, se présente sous forme d'un ensemble continu formant une longue barrière par rapport au littoral, essentiellement constituée de massifs anciens, prolonge le socle kabyle par sa partie interne (monts de Collo, monts de Skikda et Djebel Edough) et par sa partie externe (Djebels Babors et Djebel Tababort). Le littoral est formé de petites plaines dont les plus riches sont celles de la région d'Annaba (Jijel, Skikda, Annaba, Taref) c'est aussi une étroite bande bénéficiaire des sols fertiles, pluviosité abondante, températures douces, excluant le gel et autorisant les cultures les plus variées et les plus délicates (Touati 2010).

Plus au Sud, s'étalant parallèlement au nord tellien, la chaîne atlasique, elle correspond à l'Atlas Saharien qui donne l'impression d'un ensemble discontinu entrecoupé par de multiples îlots montagneux d'altitude basse à moyenne, caractérisée par une morphologie plus massive. (Raham 2001). Les plus imposants de ces chaînes sont celles des Aurès dont les crêtes culminent à plus de 2.000 mètres et surplombent la cuvette du Hodna à l'Ouest et le Chott Melghrir au Sud. C'est un grand ensemble constitué par un axe anticlinal jalonné par deux

monts dérivés, le Djebel Azreg et le Djebel Chelia (2.328 m). De part et d'autre d'Arris, deux synclinaux perchés, le Djebel Zellatou (2.017 m) et le Djebel Mahmel (2.321 m), s'inclinent vers le Sud – Ouest. Au Nord, un bombement anticlinal qui domine la dépression de Batna, sépare l'Aurès du Belezma. Au Sud Est, un vaste dôme se prolonge par un pli anticlinal étroit culminant au Djebel Aidel (2.177 m) au-dessus de Khenchela. Ce sont, ainsi d'imposants massifs qui se dressent et constituent une barrière orographique qui bloque les influences venant du nord. C'est le domaine de la steppe. Cette zone présaharienne qui connaît une aridité et une rigueur hivernale n'autorise que l'élevage (Touati 2010).

Ces deux grands ensembles montagneux encadrent les hautes plaines qui se présentent sous la forme d'un couloir naturel. Les hautes plaines, hautes par leur altitude de 700 à 1000 mètres et plaines par leur platitude, s'étalent d'est en ouest et se caractérisent par une position continentale. Ces dernières occupent des superficies beaucoup plus importantes que les basses plaines (plaines littorales et bassins intérieurs) qui se caractérisent par leur exigüité. Les hautes plaines se distinguent par deux sous-ensembles dont le premier, se situant au nord, se rapproche du domaine tellien et le second plus au sud, c'est-à-dire la steppe, correspondant à l'espace de raccordement ou de jonction entre le domaine tellien et le domaine saharien (Touati 2010 ; Raham 2001).

La région du Nord-est, comporte plusieurs plaines immenses, dont l'agriculture s'articule principalement autour de la production céréalière et de l'élevage, tout en combinant d'autres spéculations agricoles, la diversité des systèmes de production est la résultante de la conjugaison des conditions physiques, climatiques et des facteurs structurels des unités agricoles.

Nous pouvons distinguer deux types ;

- Les plaines côtières particulièrement celle prise dans la présente étude qui représente la région d'Annaba et regroupe la plaine côtière Jijeliene, vallée du Kébir à Skikda, plaine de Bouteldja et d'Annaba, s'étalant toutes sur une surface totale de 1500 Km².
- Les hautes plaines, elles sont topographiquement perchées et étendues contrairement aux plaines côtières citons ;
 - La plaine de Sétif avec une superficie atteint les 3718 Km²
 - La plaine de Meskiana à Oum el Bouaghi avec une superficie de 1581 Km²
 - Les plaines de Tebessa composées de trois plaines connues sous les noms d'Elma Abiod, Chréa, Tebessa et Morssot avec un total de superficie 2391 Km².

- La plaine Batna comprend aussi trois plaines celles d'Elmather, Blezema et Ain Touta ainsi une superficie totale de 1988 Km².
- La plaine de Hodna qui est la plus vaste de toutes les plaines avec 9625 Km²
- Rajoutant la plaine saharienne d'el Outaya à Biskra s'étalant sur une superficie de 1289 Km².

Ces sept grandes plaines feront l'objet d'une étude de sécheresse dans la présente thèse cependant, il existe encore d'autres plaines connues à titre d'exemple la plaine de Rémila à Khenchela, de F'kirina, Bir Chouhada, Souk Naamane, et Teleghma à Oum El Bouaghui, Taoura à Souk Ahras, de Tamlouka et de Guelma, Côtiers de Béjaia et de Taref.

2.3. Contexte géologique

La géologie de la zone correspond à des ensembles morpho-structuraux, qui commence au Nord par une chaîne plissée de l'Atlas tellien caractérisé par une structure complexe et jeune, elle a été plissée et charriée au cours du Tertiaire, son volume montagneux mis en place par des mouvements tectoniques au plio-quadernaire. Les nappes charriées, empilées les unes sur les autres et constituées généralement de terrains meubles, favorisant une érosion intense. Ensuite, vers l'intérieur des terres, la large plate-forme des hautes plaines correspond à un bâti structural rigide, soumis à une tectonique cassante. Les plaines de remblaiement plio-quadernaire correspondent souvent à des dépressions tectoniques ou certaines d'entre elles sont fermées par des verrous triasiques, favorisant l'endoréisme avec la formation de lacs salés (sebkhas).

Plus au Sud, la chaîne atlasique dont les assises géologiques sont mises en place au Secondaire, cette dernière est formée de grands plis réguliers, constitués essentiellement de roches calcaires. Ces structures plissées (anticlinaux et synclinaux) impriment le paysage vigoureux de l'Aurès, Nememcha et celui de la diagonale montagneuse du Hodna. Le piémont saharien, limité à la flexure saharienne (accident tectonique marquant entre le socle africain tabulaire et la zone plissée) amorce quant à lui, la vaste étendue table rigide, le bouclier saharien.

Au final à l'extrême Sud de la région, la grande dépression fermée du Chott Melrhir, constitue une zone d'affaissement «la fosse Sud-aurasienne» où de vastes dépôts sédimentaires dus à l'érosion se sont accumulés dans la cuvette et où l'endoréisme s'est installé avec les épisodes climatiques secs du Quadernaire. Elle s'inscrit dans le prolongement des fossés de subsidence, abritant les hydro systèmes endoréiques des chotts El Rharsa, Djerid et El Fedjadj en Tunisie (Mebarki A. 2009).

2.4. Le réseau hydrographique

L'Algérie compte en tout (17) grands bassins versants dont huit (8) se trouvent dans la partie Nord-est (Figure. 2.2).

Ces huit bassins hydrographiques se divisent en deux catégories :

1- Les bassins tributaires de la Méditerranée :

Comme le nom l'indique, ces bassins sont situés au Nord de la région, dont l'écoulement exoréique et, où les oueds se jettent directement dans la mer Méditerranée, à régime quasiment pérenne à savoir ;

Les Côtiers Constantinois -03, le Kebir Rhumel-10, le Seybouse-14, Soummam-15 et la Medjerda-12, rajoutant la partie Ouest du bassin Côtiers Algérois-02.

2- Les bassins endoréiques

Ces bassins situés un peu plus au Sud à écoulement endoréique dont les oueds se jettent dans des dépressions intérieures fermées citons ;

Les hauts plateaux Constantinois-07, Chott Hodna-05 et Chott Melrhir-06.

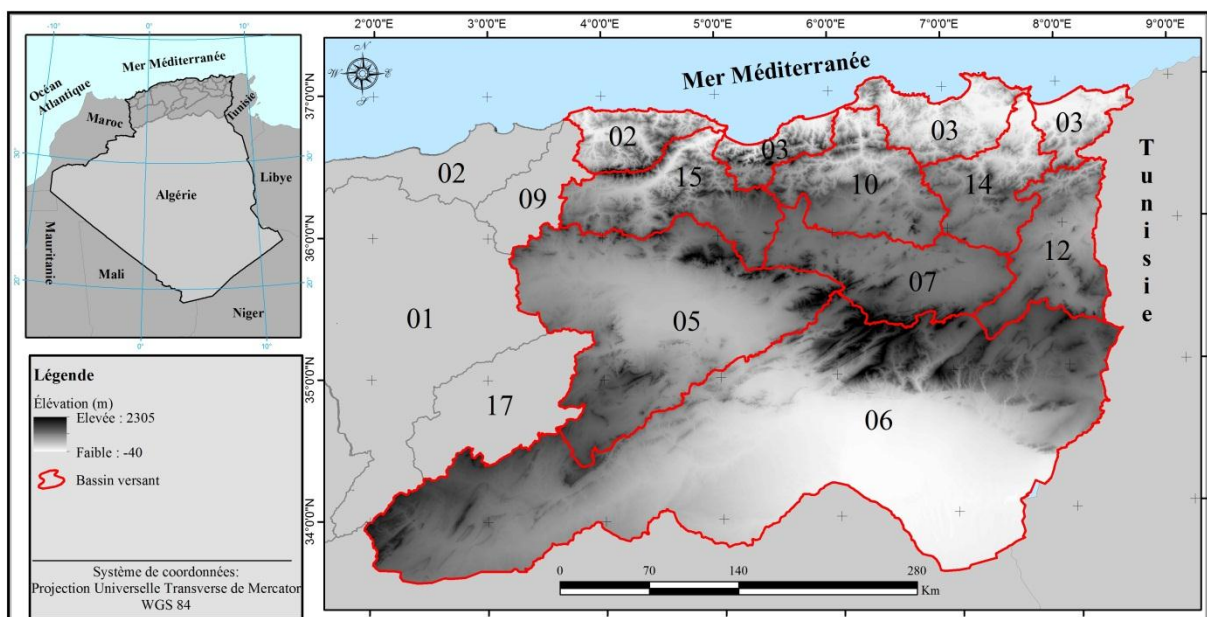


Fig. 2.2. Le découpage de la région en bassins Hydrographiques

En prenant en compte la partie Ouest du bassin des côtières Algérois, ce qui fait une superficie d'environ 150 181 Km², dont le bassin de Chott Melrhir représente presque 50 % de la surface totale.

Le tableau 2.1 récapitule les surfaces de chaque bassin attribué à son code d'après le service de l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques (ANRH).

Tableau 2.1 : Liste des bassins hydrographiques de la région et leurs totales superficies

Bassins	Code	Superficie en Km ²
Côtiers constantinois	03	11 131
Chott Hodna	05	25 843
Chott Melrhir	06	67 550
Hauts plateaux Constantinois	07	9 578
Kebir Rhumel	10	8 812
Medjerda	12	7 775
Seybouse	14	6 480
Soummam	15	9 121
La partie Ouest du côtiers Algérois	02	3 891

Le plus grand bassin hydrographique de la région est celui de Chott Melrhir, il contient également le point le plus bas du pays avec moins de 40 m. C'est une grande dépression lacustre réceptacle les oueds descendent Nord-sud du flanc méridional de l'Aurès-Nememch et oued Djedi.

Ces bassins sont équipés d'un réseau d'observations hydro-climatologique constituer de plusieurs types de stations de :

- 50 stations hydrométriques dont, 31 sont automatiques et 19 de types classiques.
- 243 postes pluviométriques
- 88 pluviographes dont 53 stations automatiques
- 16 stations climatologiques complètes

Cependant, lors de la collecte des données principalement pluviométriques auprès des services concernés, plusieurs de ces postes sont en arrêt total depuis un bon moment, d'autres fonctionnent seulement très récemment avec des données mensuelles qui ne dépassent pas les 20 ans, rajoutant à cela des stations qui ont des séries de données comportant plusieurs décennies de lacunes et donc inexploitable ce qui a rendu la tâche d'acquisition de données très délicate.

Les bassins hydrographiques présentent en général une forme allongée et un temps de concentration des eaux de ruissellement assez long, à titre d'exemple le réseau hydrographique du bassin Soummam qui est très développé. Il draine les apports de 10 sous bassins constitués de neuf Oueds principaux (Azero, Ziane, Fataissa, O'kriss, Bouktou, Eddous, El Main, Bousselem et Soummam), totalisant une longueur d'environ 726 Km dont le plus court est de 23 Km (O'kriss) et le plus long de 226 Km (Soummam). La plupart de ces

cours d'eau sont actifs au cours de la période hivernale, ces bassins sont drainés vers la mer Méditerranée.

Quant à l'exemple de Sud le bassin du Hodna est constitué d'un réseau hydrographique riche dont l'exutoire est le Chott el Hodna, les oueds principaux qui s'écoulent vers le Chott sont : Bitam, Sbisseb, M'sila, Djenane, M'cif, Boussaada, Barika, Soubella, El ham et K'sob, leurs totaux linéaires est de 816 Km.

2.5. Contexte climatique

2.5.1. Le climat

La région Nord-est connaît un climat le plus varié du pays sous l'influence de la mer méditerranéenne, le relief diversifié et l'altitude, il diffère d'une zone à une autre en allant à l'intérieur des terres.

En effet, au Nord le climat méditerranéen englobe principalement le littoral avec un hiver relativement froid et pluvieux et un été chaud et humide, un peu plus vers l'intérieur, où se trouve la chaîne de l'Atlas Tellien on rencontre un climat subhumide plus sec, reçoit plein de fouet et des flux humides du Nord caractérisé par un hiver froid et pluvieux et un été sec et chaud.

Entre les deux Atlas Tellien et Saharien se situe les hauts plateaux, le climat désormais semi-aride avec un hiver beaucoup plus froid, neigeux dans les sommets de plus de 1000 m d'altitude et un été très sec et chaud.

L'Atlas Tellien empêche la majorité des vents humides qui vient du Nord de passer vers l'intérieur du pays pour en arriver en mince quantité aux hauts plateaux.

Plus au sud, on rencontre le climat aride, chaud et sec en été doux en hiver, ce climat est désertique dont la précipitation annuelle est très faible.

Le caractère aride et semi-aride s'explique à travers la circulation générale atmosphérique, les grands ensembles géographiques du pays et la latitude. La dorsale anticyclonique, fréquente sur l'ensemble Maroc-Espagne en automne et au printemps, empêche l'occurrence des pluies.

L'Atlas Saharien constitue une véritable barrière de protection contre le Grand Erg Occidental et le Sahara aride. Il joue également un rôle de régulateur thermique atmosphérique, car il tempore la chaleur des masses d'air chaudes qui viennent du Sahara par soulèvement vertical et assèche l'air frais qui vient du Nord par l'effet de subsidence en direction du Sahara. Le Sahara est caractérisée par une aridité extrême. Les pluies sont rares,

mais peuvent par moment, avoir un caractère brutal, torrentiel et dévastateur en emportant tout sur leur passage (Tabet 2008).

2.5.2. Les précipitations

Le régime pluviométrique est très irrégulier du fait de l'étendue de la région et sa diversité climatique et morphologique, la moyenne annuelle des précipitations diminue notamment en s'éloignant de la mer vers l'intérieur des terres.

Tout à fait, la partie Nord de la région est caractérisée par une pluviométrie très importante dépassant dans la plupart des zones les 750 mm et atteignant jusqu'à 1700 mm aux régions de Collo et Zitouna, sur les sommets Telliens, la moyenne annuelle peut arriver à 1000 mm du fait de l'altitude et les flux doux arrivant du Nord alors que les valeurs s'abaissent plus vers le Sud où elle ne devance pas les 550 mm et encore moins dans les plaines de l'extrême Sud où la précipitation varie seulement entre 100 et 250 mm.

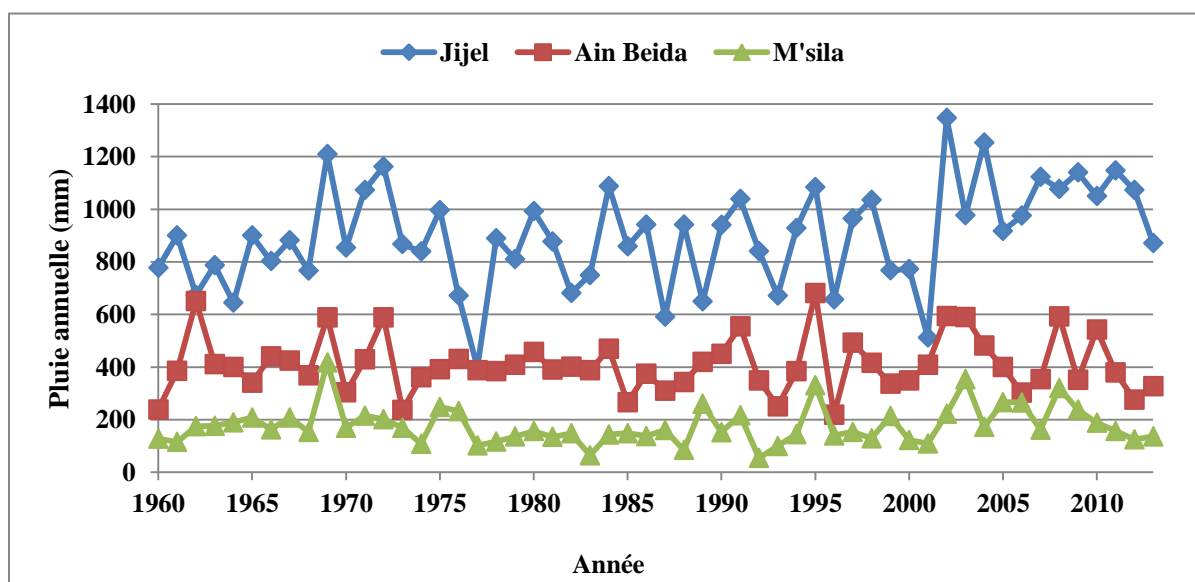


Fig. 2.3: Répartition graphique des précipitations annuelles aux stations de Jijel, Ain Beida et M'sila pour la période étalant de l'année hydrologique 1960-1961 à 2013-2014.

Comme montre le graphique ci-dessus, l'irrégularité des précipitations annuelles se différencie d'une zone climatique à une autre, à titre d'exemple la station de Jijel située dans un climat humide les précipitations peuvent atteindre jusqu'à même 1300 mm tandis que la région d'Ain Beida caractérisée par un climat semi-aride, les précipitations ne dépassent pas les 700 mm, l'autre exemple que nous pouvons citer est celui de la station de Msila, située dans une zone aride où la précipitation moyenne est autour de 150 mm et le maximum qui peut être enregistré est de moins de 380 mm. Néanmoins, on peut souligner que dans même zone climatique le régime pluviométrique peut être totalement différent, cela est dû principalement au degré d'aridité ou d'humidité où se situe la station.

L'indice de concentration des précipitations (De Luis et al. 2000 ; PCI) donne plus de détails sur la manière de distribution des précipitations dans l'année à travers toute la région, dont l'indice est plus petit dans les régions côtières et montagneuses du Nord, bien exposée aux vents humides et augmente vers les plaines du Sud dans les zones où les précipitations sont rares (Merabti et al. 2017b). La précipitation annuelle est donc beaucoup plus concentrée dans quelques mois de l'année et la grande quantité tombent entre les mois de novembre et février.

2.5.3. Les températures

Les températures quant à elles, affichent des différences assez remarquables, du fait de la variété du climat et de l'altitude, les enregistrements moyens au littoral varient de 18°C à 21°C, en hiver se situent entre 8°C et 15°C, contrairement à celles aux hauts plateaux et steppe qui sont beaucoup plus bas avec une moyenne de température en général de 14°C à 16°C et elles chutent en hiver jusqu'à 6°C et 5°C.

Plus au Sud les températures sont encore plus élevées, situant entre une moyenne de 19°C et 23°C. En hiver souvent les températures dans cette région sont inférieures à celles enregistrées au littoral et supérieures par rapport à celles des hauts plateaux, en revanche en été on enregistre des chiffres de températures très grandes dépassant les 40°C.

On note aussi que les moyennes en été restent relativement voisines sur les régions de l'Atlas tellien et les hauts plateaux.

La température peut descendre parfois au-dessous de 0°C en hiver particulièrement sur les montagnes et les hauts plateaux dont il neige fréquemment, le mois de janvier est le mois le plus froid de l'année et juillet le plus chaud.

2.5.4. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration dépend fortement de l'intervention de trois facteurs, climatiques, géographique, biologiques et pédologiques. Différentes équations d'estimation de l'évapotranspiration potentielle peuvent être utilisées, plus généralement l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite 1948) du fait qu'elle est une équation purement climatique qui représente la demande évaporative de l'atmosphère (Allen et al. 1998 ; Allen et al. 2011). Elle est directement liée à la durée de l'ensoleillement, c'est une équation très connue utilisée dans plusieurs travaux de recherche partout dans le monde.

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) s'est donc basé sur l'équation susmentionnée, la figure (2.4) montre la variation moyenne de l'ETP à travers la région d'étude au mois de janvier considéré comme le plus froid de l'année et celui de juillet le plus chaud, pour la période étalant de 1979 au 2014 .

En mois de janvier, l'évapotranspiration potentielle moyenne ne dépasse pas les 24 mm, cette valeur maximale caractérise la région Nord où le climat est humide, la zone se trouve proche de la mer et comporte plusieurs barrages et retenues avec un couvert végétal très dense, contrairement au Sud là où la moyenne varie seulement entre les 14 et 5 mm.

En ce qui concerne le mois le plus chaud de l'année celui de juillet, l'ETP moyenne dépasse en général et dans la totalité de la région les 250 mm, néanmoins les valeurs maximales se trouvent plutôt dans les plaines du Sud dépassant les 370 mm, ces régions sont caractérisées par un climat aride, où les températures enregistrées sont très élevées.

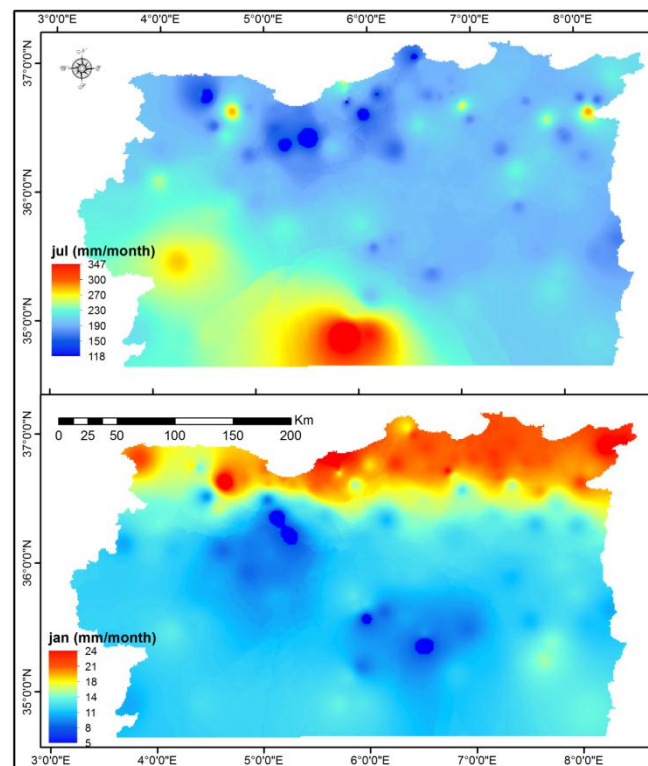


Fig. 2.4. La moyenne mensuelle d'évapotranspiration potentielle des mois de Juillet et de Janvier

La variation de l'évapotranspiration potentielle utilisant l'équation de Thornthwaite dans la région est en accord avec la carte élaborée par Mebarki (2007) et qui s'est basé sur la formule dite ETP.A.N.R.H, afin d'obtenir des résultats spécifiquement pour le climat Algérien. Cette formule donne une bonne approximation de l'ETP Penman et elle se calcule à partir de la température moyenne mensuelle et de la position de la station (Mebarki et Laborde 2014). En effet la figure 2.5 représente l'ETP moyen du mois d'Avril, elle montre que les zones du Sud peuvent avoir une moyenne d'ETP dépassent les 200 mm, tandis qu'en

s'approchant de littoral, une diminution importante d'ETP s'enregistre allant de 60 jusqu'à 120 mm.

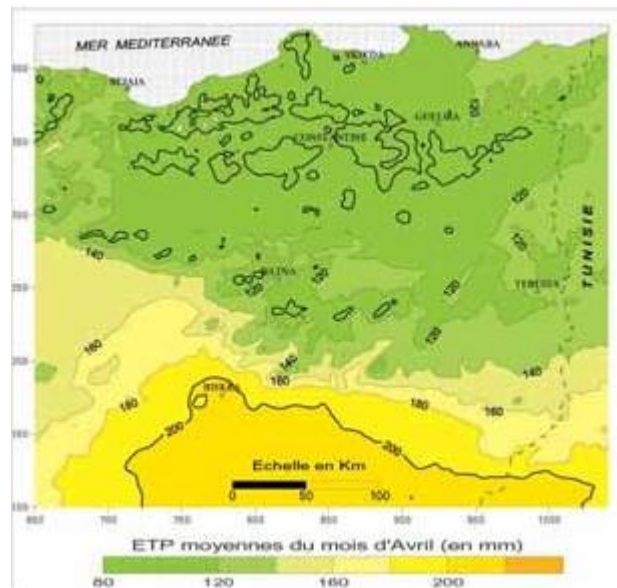


Fig. 2.5. La moyenne mensuelle d'évapotranspiration potentielle des mois Avril (Mebariki 2007)

2.5.5. Le sirocco

Parmi les éléments caractérisant le climat Algérien c'est un vent violent venant causes du Sud, cause beaucoup de dégât aux cultures du fait qu'il est chargé de particules de sable extrêmement ténues. Il se produit beaucoup plus en été et de moins en moins en hiver.

Conclusion

Le présent chapitre a tenté d'apporter des aperçus globaux de la région d'étude sur différents secteurs ; géographiques, morphologiques et climatologiques, dans le but de dégager les grandes caractéristiques qui représentent le milieu naturel, ce dernier s'allonge sur une distance de plus de 350 Km du Nord au Sud et environ 500 Km de l'Est à l'Ouest.

Les unités physiques qui distinguent le milieu se divisent en trois types, le Tell et l'Atlas Tellien, les hauts plateaux et l'Atlas Saharien et en dernier le Sahara,

L'altitude moyenne varie de 10 à 400 m sur le littoral, en allant vers le tell à l'intérieur des terres les basses montagnes avoisinent les 700 m tandis que les massifs du tell atteignent les 1000 m. Les hautes plaines peuvent atteindre jusqu'à 1200 m, tandis que celle de Hodna de 400 m, dans l'Atlas Saharien les altitudes varient de 1400 m et peuvent aller jusqu'à plus de 2000 m. Tanis que le point le plus bas de l'Algérie se trouve au chott Melrhir avec moins de 40 m.

L'aspect géologique est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du tertiaire par les mouvements alpins. La végétation est très variée, sous l'influence du climat et l'existence de différentes catégories des sols.

Les données relatives au climat restent très limitées particulièrement dans les régions du Sud, contrairement au Nord où se concentre la majorité d'informations surtout à travers le réseau pluviométrique relativement dense. Au final, acquérir une bonne connaissance sur les caractéristiques principales du milieu naturel permettra d'être un support pour la suite de projet et avoir une meilleure analyse et interprétations des différents résultats.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

Introduction

De nombreux chercheurs ont développé des différentes méthodes et plusieurs outils pour les études liées au climat parmi lesquels nous utilisons dans la présente étude afin de tenter d'apporter des meilleures réponses à nos problématiques.

Cependant, avant d'entamer cette partie, le suivi de l'évolution du climat d'une région nécessite tout d'abord de longues et de nombreuses séries d'observations. Celles relatives aux stations pluviométriques sont d'une grande importance pour les études statistiques et climatiques, pour la gestion des ressources en eau ainsi que pour la construction des ouvrages hydrauliques.

Nous savons que, plus le réseau pluviométrique est dense et la période des séries est longue, plus l'information est meilleure. Malheureusement, ce n'est pas une tâche facile d'en procurer avec telles conditions, car nous disposons rarement d'une série de données parfaitement continue.

En premier lieu, le présent chapitre se focalise plutôt sur le traitement, le critique et l'analyse des données à utiliser afin d'avoir une base de données exploitables et beaucoup plus fiables. Par la suite nous allons présenter les différents indices de sécheresse appliqués, ceux qui prennent uniquement les précipitations comme données d'entrée à savoir l'indice standardisé de précipitation (SPI), l'indice Z-score, l'indice de China-Z (CZI), le China-Z modifié (MCZI), l'indice de pourcentage à la normal (PNI), l'indice efficace de la sécheresse (EDI), l'indice de déciles (DI) et puis l'indice de reconnaissance de sécheresse (RDI) qui prenne en considération dans son calcul l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations (P). Ensuite, nous allons aborder le modèle de prévision Markovien d'ordre I et d'ordre II à l'échelle annuelle et saisonnière en se basant sur les résultats de SPI-12 et SPI-3 respectivement et au final, comme une dernière partie, nous débordrons l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour l'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans la région ainsi que l'utilisation du test de Mann-Kendall modifié dans le but d'élaborer une analyse des tendances de sécheresse.

Les différents outils et test statistiques et hydrologiques étaient appliqués en faisant appel à plusieurs logiciels et programmes dans le but de réduire le temps de calcul et avoir plus de précision citons ; Logiciel Xlstat, le programme R, Statistica, Khronostat, Hyfran, Hydrolab ainsi que les logiciels de système d'information géographique pour la cartographie ArcMap et Mapinfo.

3.1. Analyse et traitement des données de précipitations

Les données de précipitations utilisées proviennent de l'organisme responsable du réseau pluviométrique en Algérie, plus exactement l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques connue sous l'abréviation (A.N.R.H) des deux directions d'Alger et de Constantine. Avant d'entamer l'exploitation de l'ensemble des séries obtenues, il est indispensable d'examiner et d'améliorer sa qualité, car inévitablement il se peut qu'il y ait des erreurs accidentelles affectant la précision des données et qui ne doivent pas dépasser un certain seuil, rajoutant les erreurs systématiques susceptibles d'être commises très souvent due au calibrage de l'appareillage et affectant principalement la fiabilité des données.

3.1.1. Critiques et choix des stations

Les valeurs aberrantes peuvent nous mener sur de mauvaises pistes et nous entraîner à des fausses interprétations, pour cela il faut passer par un contrôle minutieux de la qualité des données.

Dans sa thèse (Khaldi 2005) résume le contrôle des séries d'observations en trois catégories ;

- Les contrôles de cohérences internes décelant l'incohérence qui peut avoir entre les paramètres d'une série.
- Les contrôles de cohérences temporelles vérifiant la vraisemblance des variations dans le temps d'un paramètre.
- Les contrôles de cohérences spatiales examinent la similitude des paramètres entre des stations voisines.

Le critique primaire et visuel des séries nous a conduits à rejeter plus de 30 stations pluviométriques en raison du pourcentage très élevé des lacunes présentes dans ses séries, l'absence d'observations durant les dernières années, dû à l'arrêt total des appareillages, rajoutant de nombreuses stations avec des séries majoritairement vides et par conséquent, totalement inexploitable. Néanmoins, dans le but d'avoir un réseau pluviométrique plus ou moins dense avec une bonne qualité nous avons pris en considération les stations qui répondent aux exigences suivantes :

- La priorité aux stations qui comportent des enregistrements récents, des dernières décennies.
- Les stations présentant plus de six années consécutives de lacunes sont directement rejetées.
- Pas plus de 15 % de lacunes sur un total de série à l'échelle mensuelle.

En effet, après le critique et l'analyse visuelle des séries, nous avons pu retenir 123 stations pluviométriques (Tableau 3.1) pour une période commune s'étale de l'année hydrologique 1960-1961 à 2013-2014 soit 54 ans des données mensuelles après comblement des valeurs lacunaires.

Tableau 3.1 Liste des stations pluviométriques retenues

Code	Station	X Lambert (Km)	Y Lambert (Km)	Altitude (m)
020902	Yakourene	655.20	382.15	820
021504	Azaga Ecole	649.25	383.90	430
022002	Baghlia Village	603.65	390.00	30
030101	Bou Khelifa	715.10	370.25	160
030102	Cap Aokas	728.25	373.25	19
030104	Domaine Dehas	712.80	381.20	07
030204	Amoucha	743.60	346.15	800
030205	Ain Roua	722.90	339.95	1100
030206	Tizi Nbraham	714.45	354.10	860
030207	Souk El Tenine	736.50	369.25	60
030301	Jijel Secteur	774.10	396.15	05
030302	Texenna	776.20	377.85	700
030312	Chedia	779.40	386.50	100
030313	Souk El Arba	774.80	389.80	110
030316	Mrabet Moussa	773.90	387.60	190
030317	Metlatine	775.10	382.60	400
030319	Harma	777.85	380.60	400
030320	Ouled Guecham	775.35	380.40	529
030401	Erraguene	757.40	368.60	680
030403	Col De Fedoules	789.80	367.80	920
030504	Taher	785.60	390.50	56
030602	Zitouna	834.69	416.50	548
030705	Bou Halloufa	856.35	382.25	165
030706	Oum Toub	846.15	383.45	240
030710	Tamalous	851.65	399.95	60
030712	Afflassane	841.20	410.10	35
030903	Zardesas Bge	875.30	374.60	200
030905	Bou Snib	882.10	362.95	900
030906	El Arrouch	869.70	379.70	137
030908	Emdjez Chich	866.60	386.10	104
030909	Ramdane Djamel Berais	874.95	389.85	50
030911	Bouchtata	866.05	395.85	90
031102	Zit Emba St.Hydro	911.40	385.30	58
031105	Bouati Mohmoud	914.15	375.6	150
031106	Azzaba Pepiniere	892.30	391.35	91
031201	Ain Cherchar	909.50	393.20	34
031302	Berrahal	923.35	403.10	40
031501	La Chiffia	977.15	381.30	170
031503	Bou Hadjar	984.20	369.75	300
031601	Ain El Assel	1005.65	400.05	35
031602	Roum El Souk	1020.70	402.90	150
031604	Ain Kerma	991.60	379.35	280
050101	Ain Nessissa	583.25	290.35	680

3. Matériels et méthodes

050701	M'slia	653.15	248.00	410
050702	Ain Kherrmane	631.20	240.45	500
050801	Ced Fagues	657.10	277.90	504
050901	Medjez	673.35	289.65	636
050904	Bordj Ghedir	698.40	292.20	1054
050905	Borj Bou Arreridj	676.40	310.60	890
051005	Ksob Barrage	668.70	282.65	600
051111	Sidi Ouadah	721.50	268.75	720
051201	Merouana	790.75	263.65	1000
051203	Oued El Ma	798.25	265.75	1001
051207	Haouara Djebel	788.70	271.30	900
051703	Slim	594.90	178.20	1080
052002	Ain Rich	628.10	154.25	944
052003	Ain El Melh	634.05	173.05	956
052102	Bordj L Agha	657.45	178.20	790
061211	Oued Chelih	799.40	252.60	1180
061304	Tighghar	796.25	211.20	884
061305	Djemorah	782.35	199.80	400
061416	Biskra Secteur	776.10	178.20	130
061503	Medina	849.70	230.50	1570
061601	Foum El Gherza Bge	795.10	177.65	200
061802	Halla Boudella	877.90	203.90	750
061804	Babar	901.10	217.00	1100
062301	Cheria	959.00	231.10	1050
062308	Ain Babouche	953.05	216.75	1020
062702	Bir El Ater	990.10	173.00	855
070305	Bir Chouhada	824.80	295.30	832
070316	Batna Ferme Exp	814.70	257.35	1040
070322	Les Lacs	843.20	294.10	790
070406	Foum Toub	849.35	241.00	1220
070410	Sidi Mancar	833.70	253.25	1112
070704	Ain Mimoun M.F	886.35	243.60	1055
070707	Ain Beida	924.15	288.00	1004
100110	Chebabta	763.30	338.80	710
100303	Tadjenanet	796.15	318.00	845
100401	Bou Malek M.C	817.15	337.00	830
100403	Ain Semara	841.94	335.80	620
100505	Ouled Nacer	876.35	320.65	770
100527	Ouled Nasseur	876.80	320.70	839
100603	Hamma Bouziane	848.50	352.80	460
100620	El Kheneg	838.50	357.45	300
100708	Ouled Messaouda	802.20	384.20	585
100711	Settara	825.10	385.90	280
120103	Ain Seynour	964.05	348.20	904
120104	Khemissa	945.50	332.50	900
120105	Taoura	980.55	331.55	850
120201	Meskiana	949.70	271.00	845
120202	Dhalaa	940.85	250.40	980
120301	Tebessa P.C	991.90	247.20	890
120307	Bekkaria	1002.35	244.55	895
120318	Morssot	979.70	273.70	728
120402	El Aouinet	967.80	297.40	650
120504	El Kouif	1009.70	259.15	1100

140103	Berriche	921.85	300.50	800
140105	Ain Settara	922.50	318.50	740
140205	Ain Makhlouf	909.02	336.82	834
140302	Bordj Sabath	888.73	355.02	525
140403	Heliopolis	924.84	366.79	220
140502	Mechroha	961.15	351.55	750
140505	Bouchegouf	948.72	362.49	154
140605	Nechmeya	930.51	378.45	254
140606	Ain Berda	937.28	387.73	114
140609	El Kerma	943.69	394.66	13
140611	Kef Mourad	953.29	389.54	19
140631	Pont Bouchet	950.25	402.80	03
150101	Sour El Ghozlane	590.60	316.45	882
150202	Bordj Okhriss	614.70	309.90	750
150204	El Esmam Sh	620.40	335.50	435
150208	Bouira	616.00	337.25	520
150402	Ben Daoud	633.85	310.85	850
150504	Tizi Nslib	661.95	356.95	1050
150607	Ain Arnat	735.07	323.67	1029
150608	Bouira Coligny	732.00	326.65	1010
150614	Tixter	715.00	308.20	960
150707	Bir Kasdali	709.50	318.40	980
150801	Sidi Embarek	699.15	313.80	1011
150802	Bordj Zemmorah	691.91	331.98	950
150904	Sidi Yahia	672.10	348.50	255
151001	Sidi Aich	677.50	369.35	196

3.1.2. Méthode de comblement des lacunes

Avant d’entamer la procédure du comblement des lacunes en utilisant la technique de bouche-trous qui est intégrée au logiciel Hydrolab développé par J.P. Laborde (2003) et basé sur l’Analyse en composantes principales. Nous avons d’abord tenté d’appliquer une ACP sur les données de précipitations annuelles des 123 stations retenues sur une période adoptée présentent peu ou pas de lacunes. En effet, en formant une matrice initiale avec, en ligne les valeurs des précipitations annuelles des 123 séries et aux colonnes les années d’observations de la période adoptée.

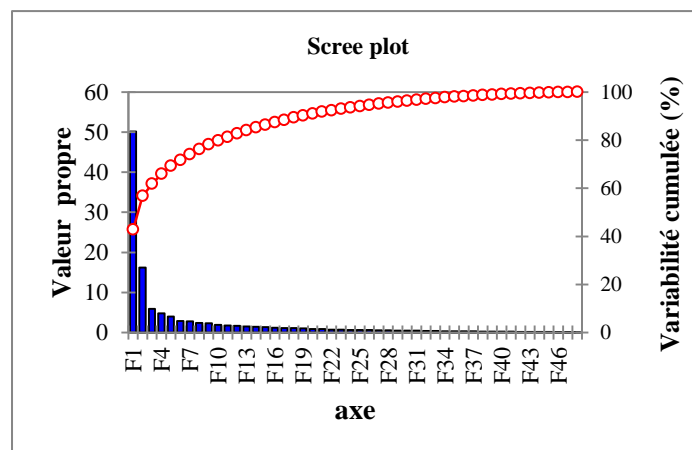


Fig.3.1 Les valeurs propres des composantes principales.

3. Matériels et méthodes

Le but de cette étape est de tirer des sous-groupes qui caractérisent chacun un régime pluviométrique et hydrologique similaire, ce qui engendre beaucoup plus de fiabilité à l'application de bouche-trous, car il est incohérent d'élaborer un comblement entre des stations ayant une moyenne de précipitations très élevée avec d'autres qui se trouvent dans un climat et un régime pluviométrique totalement différent. C'est également une forme de régionalisation de l'ensemble des stations.

Les vecteurs régionaux sont constitués par les composantes principales calculées sur la matrice des coefficients de corrélation à l'aide de logiciel XslStat. Seules les deux premières composantes sont prises en compte, le Scree plot des valeurs propres sur la figure (3.1), montre que les deux premières composantes ont une variance cumulée de plus de 65.73 % de l'information totale. Les résultats de cette analyse sont récapitulés au tableau 3.2 dont la projection des observations sur l'axe F1 et F2 nous a conduits à régionaliser visuellement et les stations qui peuvent être comblées entre elles (voir annexe).

Tableau 3.2 Liste des stations de chaque sous-groupe (S-G)

S-G 1	S-G 2	S-G 3	S-G 4	S-G 5	S-G 6	S-G 7	S-G 8
050101	051201	030301	030102	020902	030207	030101	051005
050701	051203	030319	030205	021504	030302	030104	051111
050702	051703	030602	030401	022002	030316	030312	051207
050801	052002	030905	030906	030204	030320	030403	052102
050901	061304	030908	100603	030206	030705	030712	061211
050904	061305	030911	120103	030313	030706	031604	062702
050905	061416	031201	140205	030317	030710		120318
052003	061503	070704	140302	030504	031102		120402
061802	061601	070707	140403	030903	100620		120504
061804	070305	100110	140605	030909	100708		140103
062301	070316	100303	140606	031105	100711		
062308	070322	100401	140609	031106	120104		
120201	070406	100403	140611	031302			
120202	070410	100505	140631	031501			
120301	120105	100527	150707	031503			
120307	150101	140105	150801	031601			
	150202	140502	150802	031602			
	150204	140505	150904				
		150208	151001				
		150402	151004				
		150504					
		150607					
		150608					
		150614					

Après avoir décelé les différents groupes de stations qui peuvent être comblés entre elles, nous allons tenter d'expliquer brièvement le fonctionnement de technique bouche-trou intégré au programme Hydrolab .

D’abord, faut savoir que le comblement se fait pour chaque mois séparément, ensuite une matrice contienne ces données mensuelles (d’un mois choisi) de stations affiliées à un sous-groupe.

À titre d'exemple, le tableau 3.3 affiche une matrice de données de mois de septembre pour une période de 10 ans à travers cinq (5) stations A, B, C, D et E.

Tableau 3.3 : L’application de comblement de lacune en utilisant la technique Bouche-trou.

Années	Station A	Stations B	Station C	Stations D	Station E
1960	X1,1	X2,1	X3,1	LACUNE	X5,1
1961	LACUNE	X2,2	LACUNE	X4,2	X5,2
1962	LACUNE	X2,3	LACUNE	X4,3	X5,3
1963	LACUNE	X2,4	LACUNE	X4,4	X5,4
1964	LACUNE	X2,5	X3,5	X4,5	X5,5
1965	X1,6	X2,6	X3,6	X4,6	X5,6
1966	X1,7	X2,7	X3,7	X4,7	X5,7
1967	X1,8	X2,8	X3,8	X4,8	X5,8
1968	X1,9	X2,9	X3,9	X4,9	X5,9
1969	X1,10	X2,10	X3,10	X4,10	X5,10

La première colonne représente les années d’observations, tandis que la matrice inclut les observations ainsi que les valeurs lacunaires. Notons qu'une ligne ou une colonne ne doit pas contenir que des lacunes. Ensuite, nous remplaçons les lacunes par la moyenne des valeurs observées pour chaque station, la nouvelle matrice sera soumise à une ACP dont le nombre des composantes principales égal à trois, après avoir eu de meilleurs résultats que ceux avec deux composantes. Tout en sachant que l’application sur le programme Hydrolab est très flexible, il suffit seulement de remplir les champs nécessaires à savoir, le nombre d’itérations désiré et celui de composantes principales et tenter une simulation pour remplir les valeurs lacunaires.

La projection des variables sur les composantes :

$$\begin{aligned}
 a_1 = & \quad a_{1(1,1)} \quad a_{1(1,2)} \quad a_{1(1,3)} \quad a_{1(1,4)} \quad a_{1(1,5)} \\
 & \quad a_{1(2,1)} \quad a_{1(2,2)} \quad a_{1(2,3)} \quad a_{1(2,4)} \quad a_{1(2,5)} \\
 & \quad a_{1(3,1)} \quad a_{1(3,2)} \quad a_{1(3,3)} \quad a_{1(3,4)} \quad a_{1(3,5)}
 \end{aligned}$$

- La projection des observations sur les composantes :	C1	C2	C3
	C1 (1,1)	C1 (1,2)	C1(1,3)
	C1 (2,1)	C1 (2,2)	C1(2,3)
	C1 (3,1)	C1 (3,2)	C1(3,3)
	C1 (4,1)	C1 (4,2)	C1(4,3)
	C1 (5,1)	C1 (5,2)	C1(5,3)
	C1 (6,1)	C1 (6,2)	C1(6,3)
	C1 (7,1)	C1 (7,2)	C1(7,3)
	C1 (8,1)	C1 (8,2)	C1(8,3)
	C1 (9,1)	C1 (9,2)	C1(9,3)
	C1 (10,1)	C1 (10,2)	C1(10,3)

On aura calculé sur la matrice les moyennes et les écarts-types:

$$\mathbf{Mxi(1)} = Mx1(1,1) \quad Mx2(1) \quad Mx3(1) \quad Mx4(1) \quad Mx5(1)$$

$$\mathbf{Sxi(1)} = Sx1(1) \quad Sx2(1) \quad S3(1) \quad S4(1) \quad S5(1)$$

L'estimation d'une valeur lacunaire se fait pour la Station D, variable 1 comme suit :

$$\mathbf{Xe1(4,1)} = \{ (Mx4(1,1) + Sx4(1) * (a1(4,1) * C1(4,1) + a1(4,2) * C1(4,2) + a1(4,3) * C1(4,3)) \}.$$

On obtient une première matrice dont les lacunes sont comblées :

Années	Station A	Stations B	Station C	Stations D	Station E
1960	X1,1	X2,1	X3,1	Xe4(4,1)	X5,1
1961	Xe1(1,2)	X2,2	Xe3(3,2)	X4,2	X5,2
1962	Xe1(1,3)	X2,3	Xe3(3,3)	X4,3	X5,3
1963	Xe1(1,4)	X2,4	Xe3(3,4)	X4,4	X5,4
1964	Xe1(1,5)	X2,5	X3,5	X4,5	X5,5
1965	X1,6	X2,6	X3,6	X4,6	X5,6
1966	X1,7	X2,7	X3,7	X4,7	X5,7
1967	X1,8	X2,8	X3,8	X4,8	X5,8
1968	X1,9	X2,9	X3,9	X4,9	X5,9
1969	X1,10	X2,10	X3,10	X4,10	X5,10

Ensuite, en deuxième itération la même procédure se refait et on recommence à un certain nombre jusqu'à ce que le processus se stabilise (diminution des écarts).

On peut retenir entre 8 et 10 itérations, mais d'une façon générale on a abouti à une meilleure convergence des écarts au bout de 10 itérations, puis on applique le processus pour chaque mois de l'année ainsi que pour tous les sous-groupes et nous aurons au final, 123 séries pluviométriques complètement comblées.

Nous pouvons aussi combler une valeur manquante dans une station X en prenant directement la même valeur d'une station Y voisine et soumise au même régime pluviométrique et caractérisé par les mêmes conditions. Il est possible également de remplacer une valeur manquante par la moyenne des valeurs qui précèdent de même mois. En revanche, on fait appel à ces méthodes seulement dans le cas où les valeurs manquantes représentent un pourcentage insignifiant du total des valeurs mensuelles. Il est indispensable, avant d'exploiter ces données, de passer par l'étude d'homogénéité afin de détecter les éventuelles valeurs aberrantes qui peuvent encore exister dans la série.

3.1.3. Étude de l'homogénéité des données

L'étude de l'homogénéité des séries est essentielle afin d'éviter tout problème de fausses pistes et des interprétations erronés dans le cas de l'exploitation directe des données brutes non homogènes. En effet, un changement dans le climat régional pourrait se témoigner par l'observation d'une augmentation ou réduction des précipitations totales à travers une station de mesure, néanmoins, cette variation qui manifeste pourrait également être le résultat d'une modification dans l'exposition de la station ou dans la prise de mesure.

De ce fait, il est important de développer des techniques robustes de détection de ce type de perturbations pour que les données utilisées se rapprochent le plus possible de la réalité. Le processus de détection et de correction des ruptures d'origine non climatique est appelé homogénéisation (Beaulieu et al. 2006). Plusieurs facteurs affectent la qualité et l'homogénéité d'une série pour plusieurs raisons ; changement d'observateur, des anomalies liées aux appareillages (des dégradations de l'appareil), changement de l'emplacement de station, calibrage différent, obstacles ...etc.

Tout à fait, nous avons procédé à vérifier l'homogénéité de l'ensemble de stations que nous possédons dans le but, de déceler les différentes anomalies qui peuvent avoir dans une série et améliorer la qualité de nos données pour des meilleurs et fiables résultats. À cet effet, il existe différentes méthodes classiques qui semblent efficaces pour détecter les anomalies au niveau d'une série citons ; la méthode d'Alexandersson (Alexandersson, 1986), la régression multiple (Vincent, 1998), la régression à deux phases (Easterling et Peterson, 1995 ; Lund et Reeves, 2002), l'approche bivariée (Maronna et Yohai, 1978 ; Potter, 1981), le test de Student séquentiel (Gullett et al. 1990), la méthode développée par Jaruskova (1996) et une méthode Bayésienne Rasmussen (2001). Dans le cas de la présente thèse nous sommes basé sur le test de Wilcoxon séquentiel (Karl et Williams, 1987 ; Ducré-Robitaille et al. 2003) pour vérifier l'homogénéité. Les séries de précipitations ont été corrigées en utilisant les méthodes du double cumul (Allen et al. 1998).

3.1.3.1. **Méthode numérique (Test de Wilcoxon)**

Les méthodes numériques consistent à l'utilisation de différents types de tests statistiques, d'hypothèses ou de signification, ces derniers permettent de comparer une série inconnue issue d'un échantillon donné à une série connue ou hypothétique. Dans la présente étude nous nous sommes basé sur le test de Wilcoxon.

En effet le test de Wilcoxon est un test non paramétrique, il est puissant et souple, consiste à prendre deux séries de variables aléatoires Y et X de taille N_1 et N_2 , avec $N_2 > N_1$ dont nous pouvons prendre la même série en la divisant en deux variables. En seconde étape nous classons les valeurs de X U Y par ordre décroissant et on associe à chacune des valeurs le rang qu'il lui appartient.

On calcule les quantités W_y et W_x dont W_y représente la somme des rangs de Y et c'est et égale à : $W_y = \sum_{i=1}^n rang = 1 + 3 + 5 \dots \dots \dots 12 + 15 \dots + n$ (3.1)

$$W_x = \sum_{i=1}^{n-1} rang = 2 + 4 + 6 \dots \dots \dots 11 + 14 \dots + n - 1$$
 (3.2)

L'hypothèse nulle est vérifiée si $W_{min} < W_y < W_{max}$

Avec :

$$W_{min} = \frac{(N_1 + N_2 + 1)N_1 - 1}{2} - z \sqrt{\frac{(N_1 + N_2 + 1)N_1N_2}{12}}$$
 (3.3)

$$W_{max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{min}$$
 (3.4)

z Représente la valeur de la variable centrée réduite de Gauss correspondant à une probabilité et pour un seuil de signification.

Ainsi, pour un niveau de signification de 0,05, utilisant $z = 1,96$ pour un test à deux tailles et 1,64 pour un test à une taille.

Pour un niveau de signification de 0,01, $z = 2,58$ pour un test à deux tailles et 2,33 pour un test à une.

L'hypothèse d'homogénéité est rejetée si l'une des deux inégalités suivantes n'est pas vérifiée ; $W_{min} < W_y < W_{max}$.

3.1.3.2. **La méthode graphique de simple et de double cumul**

Ces méthodes permettent de déceler graphiquement l'hétérogénéité d'une série étudiée. Le simple cumul consiste à cumuler les valeurs observées annuelles, mensuelles ou saisonnières, en générant un graphique en fonction du temps pour disposer d'un nuage de points. Ensuite, nous pouvons détecter l'existence d'une cassure et la période qu'elle a eu lieu

ce qui représente la valeur aberrante. Dans le cas l'absence totale de cassure nous pouvons juger que la série est homogène.

Même principe pour la méthode de double cumul qui consiste à sélectionner comme station de base une ou même plusieurs stations dont les observations sont fiables. Faire ensuite le cumul des données désirées de la station A à examiner et celle de référence B supposée homogène souvent voisine et proche de A, caractérisé par le même régime pluviométrique puis nous obtiendrons en utilisant un graphique de nuages de points entre les deux variables de A et B une courbe de cumul.

Si les données sont homogènes, la courbe de double cumul avoisine une droite avec un coefficient de corrélation proche de 1. En revanche, l'existence d'une cassure dans un point M, sera probablement due à des valeurs erronées.

Après avoir détecté la période et les valeurs qui représentent des anomalies nous pouvons directement les remplacer par celles de la station B s'il s'agit bien de deux ou trois valeurs jugées fausses. Cependant, la correction de plusieurs valeurs se fait en multipliant le rapport de pente $\frac{m_1}{m_2}$ par les valeurs erronées.

3.1.4. Synthèses des résultats d'homogénéisation

Nous avons utilisé, en premier lieu le test de Wilcoxon sur l'ensemble de stations que nous possédons, les résultats du test (voir l'annexe) montre l'existence de deux séries non homogènes, il s'agit des trois stations qui correspondent aux codes 052002, 052102 et 120202 (Tableau 3.4). En revanche, le test était valable pour les 120 stations. Pour plus de fiabilité, la méthode de simple cumul a pu détecter des valeurs aberrantes sur 20 séries que nous avons ensuite pu rétablir à l'aide des stations voisines jugées fiables et homogènes.

À titre d'exemple, on prend la station Metlatine qui correspond au code 030317 jugée homogène d'après le test de Wilcoxon et également avec la méthode de simple cumul qui sera par conséquent une série de référence pour les stations voisines (figure 3.3).

Le test a été employé sur les valeurs annuelles, on dispose en effet de 54 ans divisé en deux séries Y avec $N_1 = 26$ et X avec $N_2 = 28$. Comme le montre la figure 3.4, la somme des y, $\sum Y = 723$ tandis que $W_{\min} = 575$ et $W_{\max} = 855$

Ce qui vérifie la condition de $W_{\min} < W_y < W_{\max}$ et confirme l'hypothèse que la série est bien homogène. La division de la série en deux échantillons $N_1 = 26$ et $N_2 = 28$ était de la même manière sur toutes les stations puisqu'elles disposent la même taille.

Valeur	Y	X	Triés	Rang
861	861	1366	534	1
850	850	592	568	2
981	981	1086	592	3
810	810	625	614	4
614	614	1213	625	5
966	966	648	631	6
707	707	868	645	7
1010	1010	811	648	8
795	795	1025	707	9
1144	1144	821	719	10
749	749	534	743	11
1223	1223	1095	749	12
1260	1260	1042	778	13
1074	1074	919	783	14
1043	1043	631	795	15
1431	1431	645	810	16
944	944	1263	811	17
568	568	994	821	18
840	840	719	823	19
743	743	869	840	20
1152	1152	783	850	21
823	823	1057	861	22
778	778	1324	868	23
1073	1073	1123	869	24
1772	1772	1023	919	25
1057	1057	1158	944	26
1366		951	951	27
592		1054	966	28
1086			981	29
625			994	30
1213			1010	31
648			1023	32
868			1025	33
811			1042	34
1025			1043	35
821			1054	36
534			1057	37
1095			1057	38
1042			1073	39
919			1074	40
631			1086	41
645			1095	42
1263			1123	43
994			1144	44
719			1152	45
869			1158	46
783			1213	47
1057			1223	48
1324			1260	49
1123			1263	50
1023			1324	51
1158			1366	52
951			1431	53
1054			1772	54

Fig. 3.2 Test de Wilcoxon sur la station METLATINE

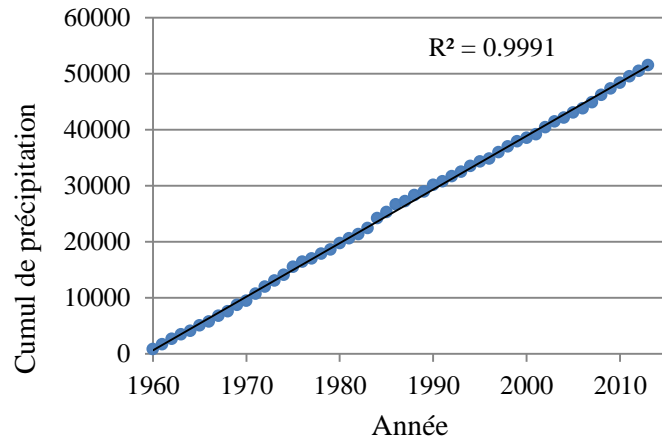


Fig.3.3. Méthode de simple cumul de la station METLATINE '030317'

Nous constatons l'allure presque parfaite du nuage des points avec le cumul des valeurs annuelles de la station METLATINE qui semble homogène et fiable après aussi le test de Wilcoxon, de ce fait nous pouvons la supposer comme référence pour les stations voisines qui présentent des anomalies dans leurs séries.

L'exemple de la station voisine Mrabet Moussa (la liste d'annexe pour les autres stations) ayant le code 030316 présentes une valeur aberrante dans sa série au niveau des dernières années où on constate que l'allure commence à s'éloigner de la droite (Figure 3.5) et une montre une légère déviation.

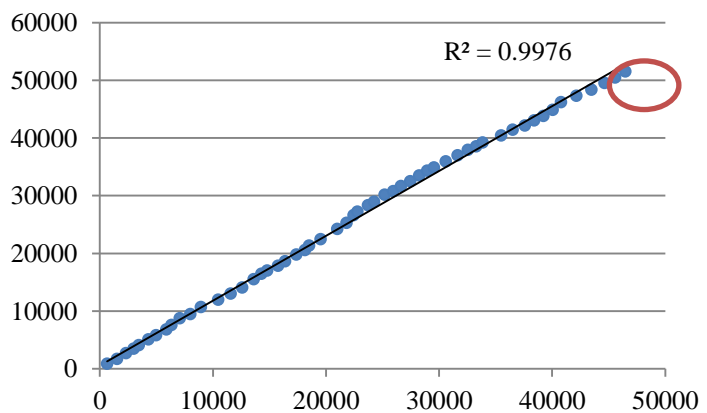


Fig. 3.4 Méthode de double entre de la station METLATINE et MRABET MOUSSA valeurs annuelles

Pour détecter exactement la période et le mois qui pose problème, nous avons tenté d'appliquer le double cumul avec les valeurs saisonnières sur les deux stations, après une vérification visuelle, il s'est avéré qu'il s'agit de la valeur du mois de juin de l'année 2011.

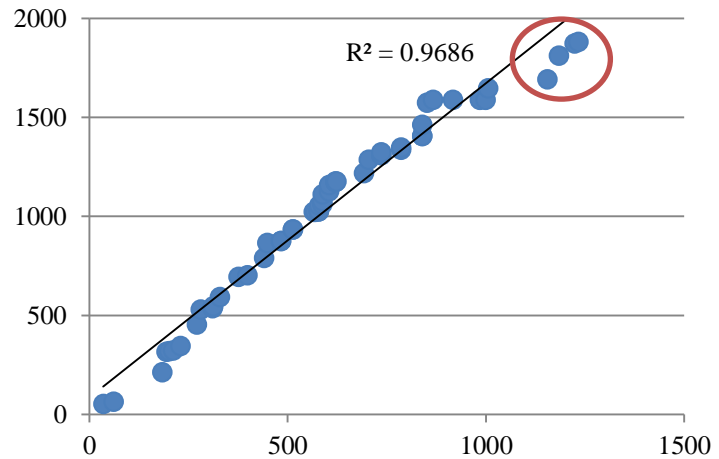


Fig. 3.5. Méthode de double cumul entre de la station METLATINE et MRABET MOUSSA avec les valeurs de la saison d'été

Le remplacement de la valeur erronée par celle de la station voisine

a directement rétabli l'allure de variation de la série. En effet la valeur aberrante, est de 149 mm en mois de juin remplacé par la valeur de la station voisine qui est de 44 mm.

Des cas similaires ont été constatés principalement le cas de la station 030319 dont la valeur aberrante a surgi au même mois de même année, le tableau 3.4 synthétise les différentes anomalies que nous avons rencontrées et put corriger.

Nous constatons que la plupart des valeurs aberrantes enregistrées particulièrement au cours de l'année 1969, les cassures sont en général très légères c'est pour cette raison que le test de Wilcoxon a considéré l'ensemble des séries homogènes. La plupart des stations possèdent très peu d'anomalies tandis qu'il existe sept stations ayant plus de trois valeurs erronées à l'exemple de la station 140611.

Les deux stations ayant le code 052002 et 052102 jugées non homogènes, possèdent une longue série de valeurs aberrantes, nous avons corrigé ses séries d'observations en tenant compte de la station 052003 voisine et jugée homogène.

Nous ne pouvons malheureusement jamais être sur des causes exactes de ces anomalies, elles peuvent être liées à plusieurs raisons, mauvaises lectures, changement d'appareillage, problème d'étalonnage ou un mauvais copiage des données sur l'outil informatique.

Les figures 3.7 et 3.8 montrent les cassures qui se trouvent dans la méthode de simple cumul des valeurs saisonnières et pour corriger ces erreurs nous essayons d'utiliser les valeurs de la série homogène 052003 en se basant sur la méthode bouche-trous.

Les nouveaux graphiques sur les figures 3.10 et 3.11 montre l'allure de nuage des points après avoir rectifié et corrigé les erreurs à travers la station de référence.

3. Matériels et méthodes

Tableau 3.4. Les différentes anomalies rencontrées et leurs corrections

Station	L'année de la Valeur erronée	Mois	Valeur	Station voisine	Valeur de station voisine
030316	2011	Juin	149	030317	44
030319	2011	Juin	243	030317	44
030705	2003	Janvier	442	030710	370
050701	1969	Octobre	179	050702	111
051201	1969-1970	Avril	157-244	051207	43-71
		Septembre	213		86
		Octobre	274		92
051203	1969-1970	Avril	132-208	051207	43-71
		Septembre	209		86
		Octobre	181		92
051703	1969-1970	Avril	71- 82	052003	13-26
		Septembre	140		113
		Octobre	158		57
052002	Série hétérogène longue cassure s'étale de 1975-1993			Corrigé en fonction de la station 052003 20 km de distance	
052102	Série hétérogène longue cassure s'étale de 1975-1993				
061503	1969	Aout	149	061304	44
061601	1969	Septembre	211	Moyenne des années précédente	13
062301	1969	Octobre	249	061601	145
070305	1969	Avril	109	070316	31
		Septembre	151		92
		Octobre	182		30
070322		Avril	93	070316	31
		Septembre	122		92
		Octobre	116		30
070410	1969-1970	Avril	93-83	Moyenne des Valeurs précédentes	38-33
		Septembre	122		28
		Octobre	116		31
100401	2002-2003	Nov	238	100403	97
		Dec	332		70
		Jan	352		136
		Fev	231		71
120101	1969	Octobre	236	Moyenne des valeurs précédentes	13
120202	1969	Octobre	401		19
120307	1971	Septembre	162	120301	38
	1973	Mars	169		93
	1991	Septembre	262		32
120504	1969	Septembre	473	120301	112
140105	1963	Juillet	112	140103	36
	2003-2004	Décembre	161- 140		68 -69
	2003	Juin	104		56
140611	2007	Mars	434	140609	218
	2008	Avril	351		149
		Mai	128		62
		Septembre	271		24
		Octobre	193		122

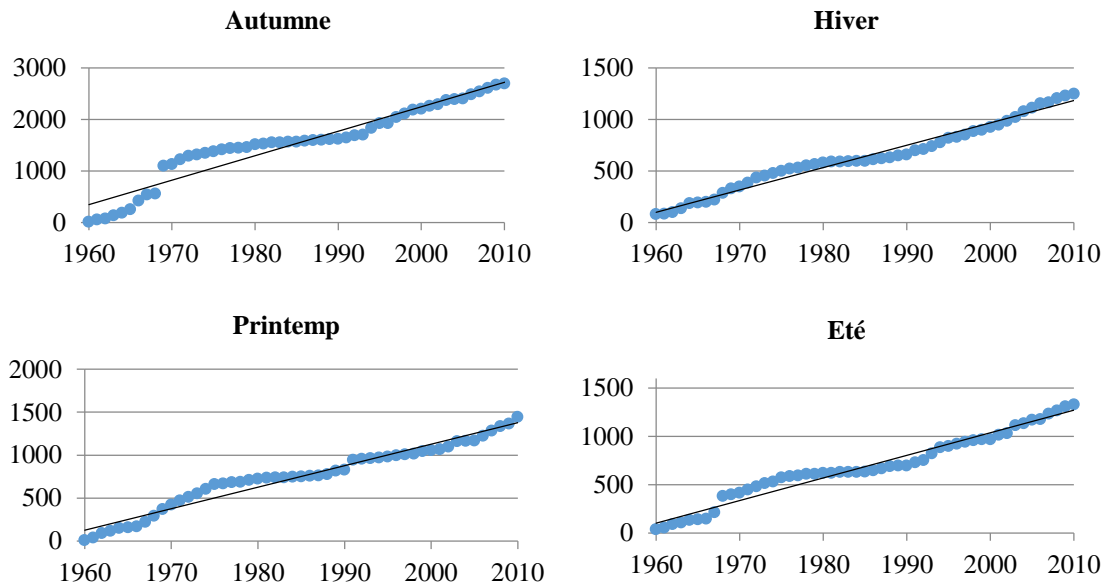


Fig. 3.6. Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052002

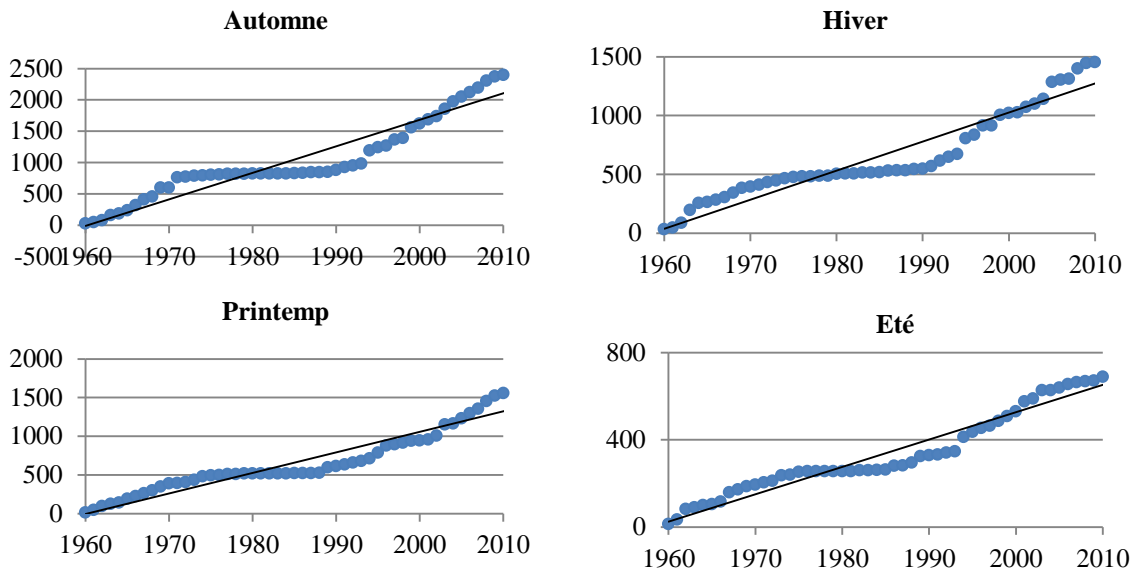


Fig. 3.7. Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052102

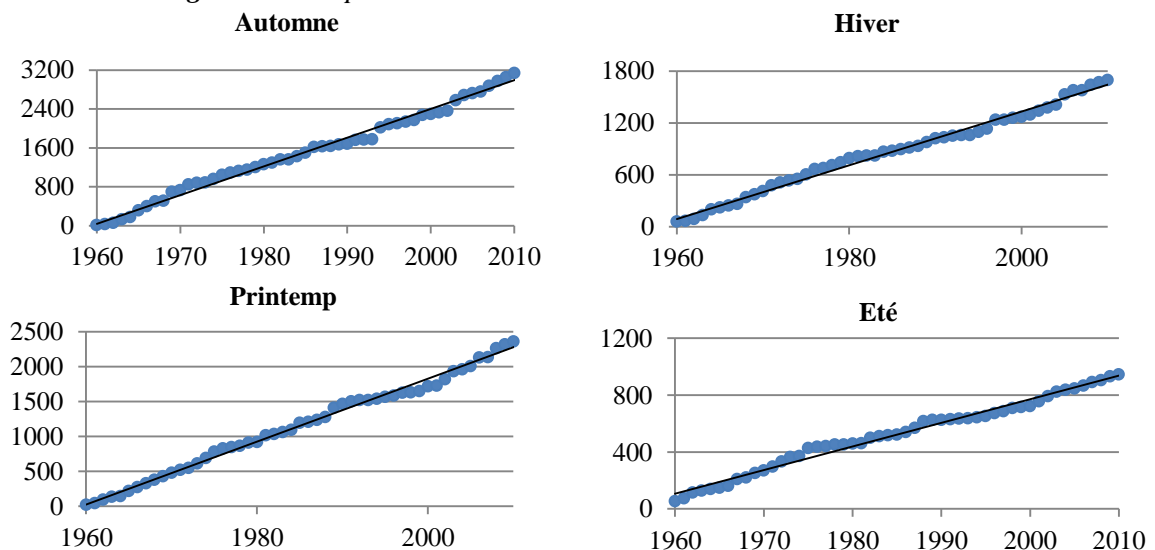


Fig. 3.8. Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052003 jugé homogène

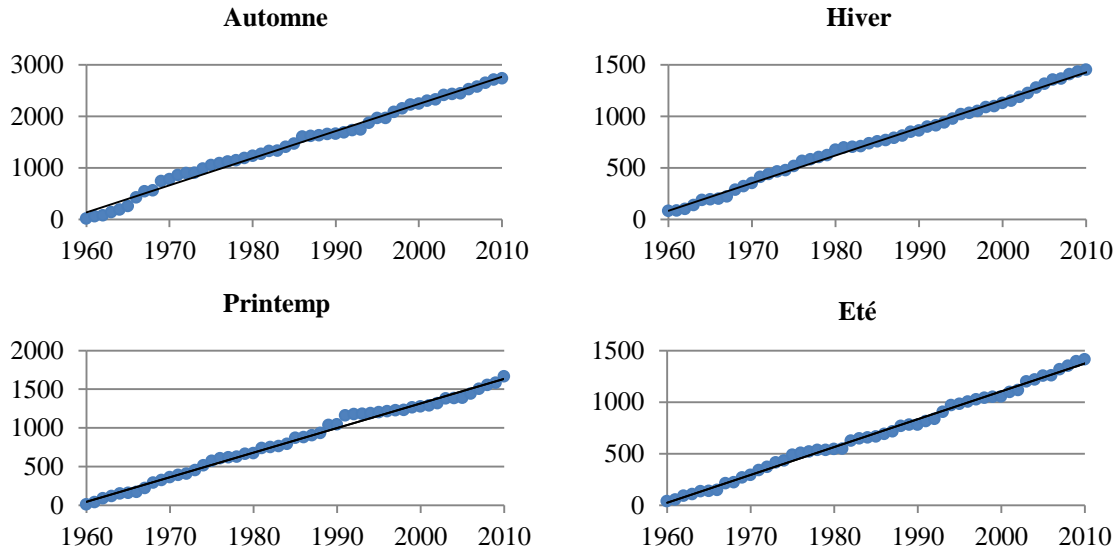


Fig. 3.9. Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052002 après correction

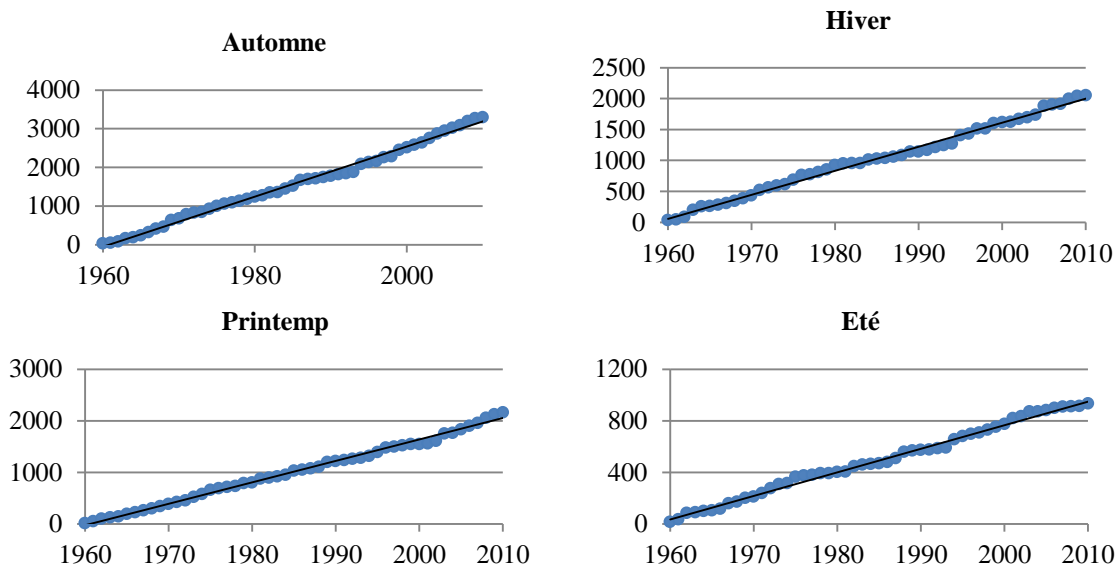


Fig. 3.10. Le simple cumul des valeurs saisonnières de la station 052102 après correction

3.1.5. Étude des ruptures dans les séries

Après avoir vérifié et corrigé l'ensemble de la base de données, désormais, elle est exploitable. Néanmoins, l'analyse approfondie peut améliorer la compréhension de comportement des séries chronologiques et ses différents mécanismes statistiques, car toute série temporelle peut n'être qu'une représentation d'un phénomène complexe.

La rupture dans une série est un changement brutal de sa moyenne à un instant inconnu. De ce fait, détecter l'existence d'une rupture et la période où elle a eu lieu, peut mener à comprendre le changement climatique dans une région donnée. Pour cela, il existe plusieurs tests qui peuvent étudier la stationnarité ou l'existence de ruptures et/ou tendances dans une

série, dans la présente thèse nous avons utilisé quatre différentes méthodes dans le but d'avoir une connaissance un peu plus claire sur la variabilité et le changement de distribution de nos données.

- Le test de Buishand (1982) ; c'est un test paramétrique qui considère la somme cumulée des écarts à la moyenne générale, les écarts cumulés pour une série stationnaire, convergent autour de la valeur 0, tandis que la non-stationnarité implique qu'il y 'ait une période dans laquelle les valeurs s'écartent conjointement de 0.
- Le test de Pettitt (1979) ; un test non paramétrique tout comme celui de Wilcoxon réputé par sa puissance et très performant.
- L'approche bayésienne de Lee et Heginian (1977) ; propose de déterminer la loi de probabilité a posteriori de ces paramètres et suppose que la date de rupture suit une probabilité uniforme c'est-à-dire il existe autant de chance qu'elle se produise à un instant ou à un autre
- La procédure de segmentation de Huber (Huber et al. 1989) ; contrairement aux méthodes précitées, celle-là s'inscrit dans le cadre de la détection d'une ou de plusieurs ruptures, ces derniers peuvent être probablement dus à plusieurs changements climatiques (Lemaitre 2002).

L'application mathématique de ces méthodes est complexe, pour cela nous sommes basé sur le logiciel Khronostat, élaboré dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne, orienté sur les analyses statistiques des séries hydrométéorologiques (Khronostat 1998). Les résultats des quatre méthodes sont récapitulés au tableau 3.5 et les graphiques de la méthode des écarts cumulés pour toutes les stations sont regroupés dans l'annexe de la thèse.

La détection des ruptures dans nos séries en utilisant les quatre méthodes ne sont pas tout à fait similaires, cependant les résultats indiquent que dans la majorité des cas où y a eu une détection de rupture, les séries comportent deux importants sauts dans la moyenne, la première s'est déroulé au début des années 70 et une deuxième plus remarquable détectée fréquemment, celle qui a eu lieu en 2001 et qui coïncide exactement avec un épisode de sécheresse très sévère avec une baisse importante de régime pluviométrique.

En effet, en premier lieu les résultats du tableau montrent la différence entre chaque test et chaque méthode, on note particulièrement que l'approche Bayésienne détecte en permanence et sur toutes les stations une rupture dans la distribution avec des dates différentes, mais dans la plupart des cas aux années 70 et en 2001, contrairement au test de

Pettitt et Buishand. Ces deux derniers détectent moins de ruptures, respectivement 34 et 38 sur le total de stations par rapport aux autres méthodes et très souvent dans les deux périodes suscitées d'après les graphiques (voir l'annexe), il s'avère que ce test détecte seulement dans le cas d'une rupture très probable ou plutôt très sûre.

Les résultats du test de Buishand et celui de Pettitt sont plus ou moins similaires, c'est-à-dire qu'ils détectent les ruptures aux mêmes fréquences à travers le nombre de cas, on peut aussi rajouter la segmentation d'Hubert avec sa particularité de détecter plus d'une rupture dans une série avec 51 ruptures détectées si on tient compte seulement d'une rupture dans la série. Nous pouvons aussi constater que dans le cas où la rupture est détectée par trois à quatre tests, on peut conclure que la rupture est évidente, alors que moins de trois veut dire que l'existence de la rupture est moins probable dans la série.

En termes de nombres, sur l'ensemble des 123 stations, quatre tests ont pu détecter simultanément l'existence d'une rupture, cela dans 28 séries, tandis qu'il y a eu 12 stations qui ont pu avoir trois tests positifs à la fois, ce qui fait un total de 40 stations qui possèdent une rupture évidente dans leurs séries. En ce qui concerne la détection avec deux tests, 17 stations sont caractérisées par une rupture moins probable.

Légende du tableau

- (*) ; Rupture non détectée
- (***) ; Rupture détectée
- (1900) ; Année (s) de rupture

Tableau 3.5. *L'utilisation des tests pour la détection des ruptures dans les séries*

Méthode ou test	Buishand	pettitt	Lee et Heghinian	Hubert
Code de station				
020902	*	*	2009	*
021504	*	2001	2001	1971 - 2001
022002	*	*	1975	*
030101	*	2001	2001	2001
030102	*	*	2001	*
030104	*	*	2010	*
030204	***	*	2001	2001
030205	*	*	1964	*
030206	*	*	1968	*
030207	*	*	1971	*
030301	***	2001	2002	2002
030302	*	*	1971	*
030312	*	*	1971	*
030313	***	2001	2001	2001
030316	***	1996	2001	2001
030317	*	*	2006	*
030319	***	2001	2001	2001

3. Matériels et méthodes

030320	*	*	1970	*
030401	*	*	2012	*
030403	*	*	2001	*
030504	*	*	2001	*
030602	***	2001	2001	2001
030705	***	1996	2001	2001-1983
030706	*	*	2001	2001
030710	*	*	1979	*
030712	*	1996	2001	2001
030903	***	*	2001	2001
030905	***	2001	2001	2001
030906	***	*	2001	*
030908	***	1982	1989	1989
030909	*	*	2001	*
030911	***	1994	1994	1994
031102	***	2001	2001	2001
031105	***	*	1980	*
031106	*	*	1960	*
031201	***	1996	2001	***
031302	***	2001	1968	1968
031501	*	*	1960	*
031503	*	*	1994	1994
031601	*	*	2001	*
031602	***	1991	1991	1991-2004
031604	*	*	2007	1997-1987
050101	*	*	1976	*
050701	*	*	2001	*
050702	*	*	1976	*
050801	*	*	2001	*
050901	*	*	1961	*
050904	*	*	2011	*
050905	***	2001	2001	2001
051005	*	*	1961	*
051111	*	*	1961	*
051201	*	*	1969	*
051203	*	*	1972	*
051207	*	*	2010	*
051703	***	*	1976	*
052002	*	*	1976	*
052003	*	*	1975	*
052102	*	*	1975	*
061211	***	1991	1991	1991
061304	*	*	1976	*
061305	*	*	1970	*
061416	*	*	1972	1967-1972
061503	*	2001	2001	*
061601	*	*	2007	*
061802	*	*	2001	*
061804	***	2001	2001	2001
062301	*	*	2010	*
062308	***	1992	1992	1966-1972
062702	***	1986	2010	1986
070305	*	*	1969	*

3. Matériels et méthodes

070316	*	*	2010	*
070322	***	1979	1979	1979-1985
070406	*	*	2001	*
070410	*	*	2001	*
070704	*	*	1960	*
070707	*	*	1960	*
100110	*	*	2001	*
100303	*	*	2001	*
100401	*	*	1996	2001-2005
100403	***	1996	2001	1975-1981
100505	***	2001	2001	2001
100527	***	2001	2001	1970-1973-2001
100603	*	*	2012	*
100620	***	1993	1993	2001-2003
100708	*	*	1968	*
100711	*	*	2001	2001
120103	*	*	1960	*
120104	***	*	2001	2001
120105	***	*	1972	1995-2001
120201	*	*	2010	*
120202	***	1982	1982	1966-1977
120301	*	1977	1975	1975
120307	*	*	1974	*
120318	***	*	2006	1976
120402	*	*	2010	*
120504	*	*	2010	*
140103	***	*	2005	2005
140105	*	1996	1996	1996
140205	*	*	2012	*
140302	*	*	2001	2001-2004
140403	*	*	1960	*
140502	***	1996	1997	1997
140505	*	*	1960	*
140605	*	*	2012	*
140606	***	*	2001	*
140609	***	*	2001	2001
140611	*	*	2001	2001
140631	*	*	2001	2001
150101	*	*	2001	2001-2002
150202	*	*	1971	*
150204	*	*	2001	*
150208	*	*	2001	*
150402	***	1992	1993	1968-1970-1976-1991
150504	*	*	2001	*
150607	*	*	2001	*
150608	*	*	1995	*
150614	*	1978	1978	*
150707	*	*	1961	*
150801	*	*	2012	*
150802	*	*	2012	*
150904	*	*	2001	1972-1974
151001	***	1975	1973	1973-2001-2002
151004	*	*	2001	2001

3.2. Données de ré-analyse

En raison de la difficulté d'acquérir les données climatiques nécessaires auprès des services concernés et dans le but d'essayer de rétablir cet obstacle, pour une étude bien détaillée et approfondie sur le phénomène de sécheresse et le climat de la région, il était indispensable d'utiliser des données de ré-analyse. Ces données sont jugées bien évidemment fiables et utilisées dans différentes études antérieures.

Tout à fait, les données mensuelles de température employées dans cette étude proviennent du système ré-analyse de prévision climatique « Climate Forecast System Reanalysis » (CFSR; Saha et al. 2010). Les données de ré-analyse de CFSR sont basées à la fois sur les archives historiques et opérationnelles des observations et sur les séries d'observations récemment retraitées, produites dans les centres de recherche météorologiques autour du monde. Le CFSR assimile les observations provenant des ballons-sondes en altitude ainsi que les observations issues des aéronefs et des satellites avec une résolution spatiale d'environ 38 km. L'utilisation de ce type de source de données est très convoitée dans plusieurs travaux de recherche autour du monde.

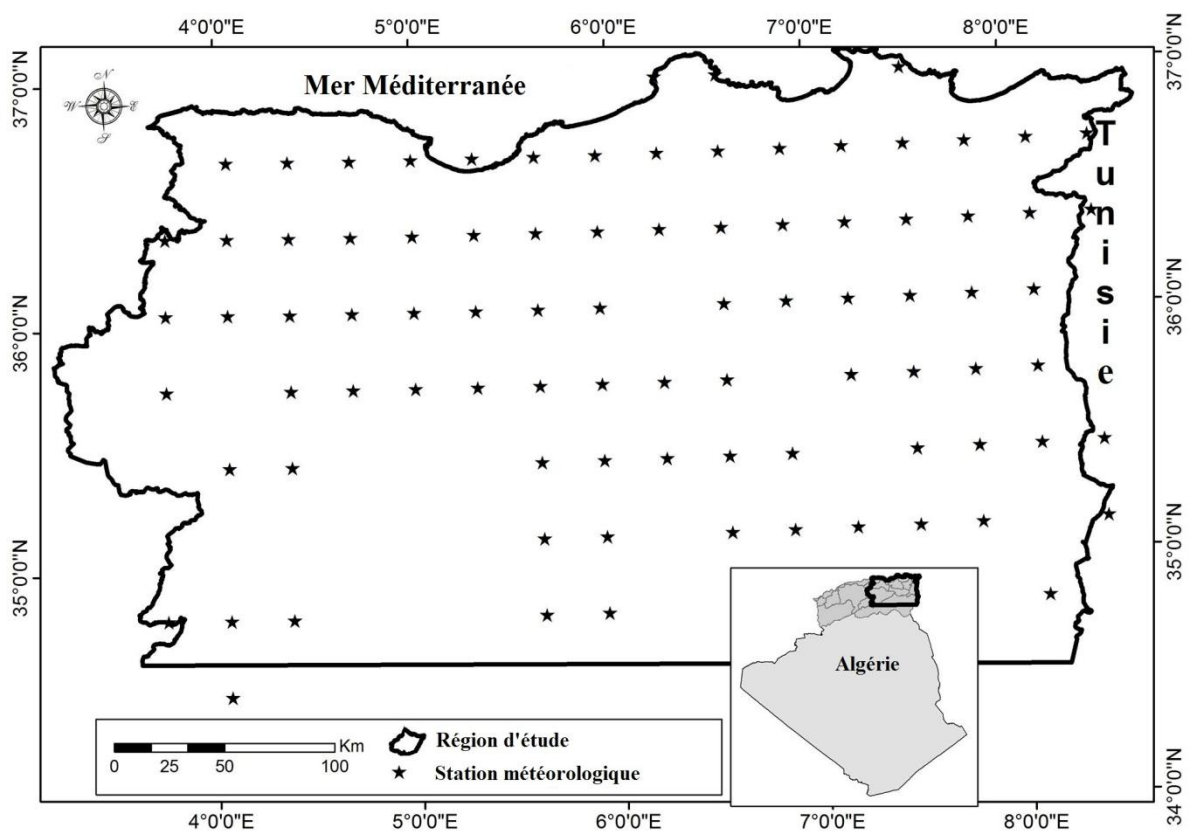


Fig. 3.11. La distribution des stations météorologiques issues des données CFSR dans la région d'étude.

En effet, diverses études et travaux de recherche publiés, ont utilisées et comparées les données CFSR aux données observées (Fuka et al 2014, Dilea et Srinivasan 2014, Mohammed et Scholz 2017, Worqlul et al. 2017) cela met en évidence la fiabilité et la possibilité de s'appuyer sur ce genre de source d'information dans le but d'établir des analyses beaucoup plus complètes.

Dans la présente étude et en premier lieu nous avons pu avoir 84 points de grille bien distribués dans la région, comportant des séries de données de températures mensuelles qui s'étalent de l'année 1979-1980 à 2013-2014. Ensuite, dans le but d'utiliser un ensemble de données de précipitations et de températures qui réfèrent aux mêmes emplacements, les 84 points de grille ont été interpolés sur les 123 sites des précipitations observées.

Pour cela, considérant la méthode de Krigeage, qui est une technique robuste et plus précise pour l'interpolation, particulièrement en ce qui concerne les indices de sécheresse (Akhtari et al. 2009). En effet, le Krigeage ordinaire a été employé pour interpoler les 84 points de grille des données mensuelles de températures issues de système CFSR aux 123 emplacements des stations pluviométriques, cette méthode est une technique stochastique et un interpolateur local qui utilise le semi-variogramme comme mesure de la dissimilitude entre les observations.

3.3. L'application des divers indices de sécheresse

Différentes méthodes ont été utilisées comme outils d'évaluation de la sécheresse tels que la mesure de l'absence de précipitations, la pénurie d'écoulement, les indices de sécheresse (IS) entre autres. Cependant, généralement l'estimation des conditions sèches futures (ou prévision de la sécheresse) a été réalisée en utilisant les IS comme l'outil le plus courant. Effectivement, plusieurs IS ont été développés et considérés comme beaucoup plus convenables que les données brutes lors de la prise de décision (Hayes, 2003).

Les IS en général sont en fonction de plusieurs variables hydrométéorologiques à savoir les précipitations, la température, l'évapotranspiration, les débits d'écoulement...etc. Certains chercheurs se basent sur le fait que la sécheresse est concrètement un déficit dans les précipitations et peut-être définie et estimer avec la pluie comme seule variable. Sur la base de ce concept, une grande majorité des IS disponibles y compris le pourcentage à la normale (PN) (Hayes, 2003), l'indice des Deciles (Gibbs et Maher, 1967) et d'autres utilisés dans la présente étude, ont été développés en s'appuyant dans ses calculs uniquement sur les précipitations comme paramètre.

Les indices basés uniquement sur les précipitations sont largement utilisés par rapport aux autres, en raison de leurs exigences moins élevées en matière de données d'entrée, de leur flexibilité et de la simplicité dans leurs calculs (Smakhtin et Hughes, 2004). Bien que, d'autres chercheurs jugent que les IS basés seulement sur les précipitations ne couvrent pas toutes les conditions et les catégories de sécheresses, car la sécheresse dépend non seulement de la pluie, mais de nombreux facteurs climatiques tels que la température et l'évapotranspiration...etc.

La sécheresse en général est un phénomène complexe difficile de savoir quand est-ce qu'elle commence ou de prédire sa durée, pour cela plusieurs techniques ont été utilisées pour développer des modèles d'approche pour la prévision de la sécheresse, y compris les modèles autorégressifs, la moyenne mobile intégrée (ARIMA) (Mishra et Desai, 2005), les chaînes de Markov (Paulo et Pereira, 2007) et les réseaux neurones artificiels (RNA) (Kim et Valdes, 2003 ; Mishra et Desai, 2006 ; Mishra et al. 2007 ; Barros et Bowden, 2008 ; Cutore et al. 2009). Ces études étaient basées dans la plupart des cas sur l'utilisation des IS.

Le présent chapitre vise dans cette partie à aborder trois sections bien distinctes ; la première s'intéresse à la définition des différents indices de sécheresse employés principalement dans la présente thèse, la seconde traite l'aspect global de l'utilisation des chaînes de Markov dans l'étude de la prévision de la sécheresse et la troisième concerne l'utilisation de l'analyse en composantes principales et le test de tendance pour l'étude de la variabilité spatio-temporelle de sécheresse dans la région

Savoir quel IS serait le mieux adapté à tel ou tel climat et à telle ou telle région est une question qui suscite force débats à travers les différents travaux publiés. Bon nombre d'indices de sécheresse et des définitions ont vu le jour, certains auteurs ont essayé de formuler des avis éclairés à ce sujet.

3.3.1. L'indice de précipitation normalisé « SPI »

L'indice de précipitation standardisé très connu par son abréviation SPI (Standardized Precipitation Index), c'est un indice statistique du type probabiliste développé par (Mckee et al, 1993), il permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période, dans le but de surveiller et identifier les sécheresses dans une région donnée.

Tout d'abord, pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels qui s'étalent sur au moins 20 à 30 ans, de préférence sur une période de 50 ans voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1999). Par la suite l'indice peut se calculer à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 9, 12 ou même plus) (Maccioni et al. 2014). Le SPI de

12 mois est plus approprié pour identifier des périodes sèches et humides d'une durée relativement longue et se rapporte mieux avec les impacts de sécheresse sur les régimes hydrologiques Paulo et Pereira (2006), tandis que le SPI de 6 mois est le plus recommandé pour les études de sécheresse qui affecte les eaux souterraines (Szalai et al. 2000), cependant pour les échelles de temps à court terme respectivement SPI de 3 et de 1 mois sont plus adaptés pour surveiller la sécheresse agricole et météorologique (Dogan et al. 2012).

Pour calculer l'indice SPI, il faut en premier lieu ajuster ses données à une loi de probabilité (gamma par exemple ou Pearson III) (Edwards et McKee, 1997 ; Wu et al, 2001 ; López-Moreno et Vicente-Serrano 2007 ; Do-Woo Kim 2009 ; Dogan et al, 2012; Maccioni et al. 2014), puis on la transforme en une distribution normale pour que l'indice SPI moyen, du lieu considéré et pour le laps de temps étudié, soit égal à zéro.

Le calcul de SPI pour une échelle de temps donnée se base sur les étapes suivantes (McKee et al. 1993, Guttman 1999) :

1- L'estimation de la distribution $F(x; \hat{\lambda})$ où $\hat{\lambda}$ c'est le vecteur des paramètres estimés. Les deux paramètres de la distribution gamma ont été adoptés avec la fonction de densité de probabilité définie par :

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (3.5)$$

Dont Γ est la fonction gamma, α le paramétré de forme et β celui d'échelle. Ces deux paramètres étaient estimés avec la méthode du maximum de vraisemblance :

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3.5a)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3.5b)$$

Dont \bar{x} la moyenne de précipitation et A est donné par la formule suivante :

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3.6)$$

Avec n est le nombre d'observations.

-2 Le calcul de la probabilité de chaque événement de précipitation $p = F(x; \hat{\alpha}, \hat{\beta})$

-3 Le calcul de quantile du standard normal $SPI = \phi^{-1}(p)$ dont $\phi(x; 0, 1)$ est la gaussienne centrée réduite.

Toute valeur de SPI peut être retransformée en précipitation par l'inversion des méthodes de calcul. La valeur de SPI est transformée en probabilité de non-dépassement à travers la distribution normale $p = \phi(SPI)$ et la probabilité est transformée en précipitation x en inversant la distribution gamma $x = F^{-1}(p; \hat{\alpha}, \hat{\beta})$ (Paulo et al. 2016).

3.3.2. L'indice Z score « Z-score »

La notation « Z » est employée pour la distribution normale qui est appelée aussi la distribution Z, le calcul de l'indice est tout simple en une équation comme suit :

$$Z\ Score = \frac{x_{ij} - x_{im}}{\delta} \quad (3.7)$$

Dont x_{ij} = précipitation de mois j pour une l'échelle i

i : l'échelle de temps désirée, il peut être égal à 1, 2, 3, 9, 12....

x_{im}, δ sont respectivement la moyenne et l'écart type des observations pour l'échelle de temps choisie.

Ce processus de conversion s'appelle normalisation ou normalisant. Le Z-score indique combien d'écarts a la valeur de précipitation au-dessus ou au-dessous de la moyenne avec lequel l'observation est jugée liée à une condition sèche si elle est au-dessous de moyenne ou humide dans le cas inverse.

C'est un indice souple, souvent confondu avec le SPI (Hayes, 2000) bien que dans son calcul l'indice Z-score ne nécessite aucun ajustement des données pour une loi de probabilité. Plusieurs auteurs ont utilisé la même formule pour calculer le SPI (Bhuiyan 2006 ; Akhtari et al. 2009 ; Jouille et al. 2013 ; Meddi et al. 2014 ; Bandyopadhyay et Saha. 2016).

3.3.3. L'indice China Z et l'indice modifié de China Z « CZI et MCZI »

Quant à l'Indice China (CZI), il a été présenté à l'Assemblée Nationale du Centre Météorologique de Chine (NMCC) au début des années 1990 (Wu et al. 2001).

Le CZI est lié à la transformation racine cubique Wilson-Hilferty (Kendall et Stuart. 1977), en supposant que les données sur les précipitations obéissent à la distribution de Pearson type III. (Wilson et Hilferty, 1931).

Il se calcul de la manière suivante :

$$Z_{ij} = \frac{6}{C_{si}} \left(\frac{C_{si}}{2} \varphi_{ij} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (3.8)$$

Dont Z_{ij} est le CZI est φ_{ij} c'est le Z score

i : L'échelle de temps et j la précipitation de mois courant

$$\text{Dont : } C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^3}{n * \delta_i^3} \quad (3.9)$$

À la place de la moyenne des précipitations dans le calcul de (φ_{ij}) on utilise La précipitation médiane et c'est ce qu'on on peut appeler (MCZI) (Morid et al 2006).

3.3.4. L'indice de pourcentage à la normale « PNI »

L'indice de pourcentage à la normale connu aussi par l'indice de rapport à la normale des précipitations, c'est un indice développé pour évaluer la sécheresse météorologique (Nikbakht et al. 2013), il est très simple et facile à manipuler Smakhtin et Hughes (2006). Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales historique (\bar{x}).

Il peut être calculé comme suit :

$$PNI = \frac{x_i}{\bar{x}} 100 \quad (3.10)$$

3.3.5. L'indice efficace de sécheresse « EDI »

L'indice efficace de sécheresse est un indice développé par Byun et Wilhite (1999) pour détecter le début et la fin d'une période de sécheresse, sa particularité par rapport aux indices précités, il a été calculé à l'origine pour une échelle de temps quotidienne (Morid et al. 2007) mais ça n'empêche que ses principes peuvent être utilisés pour les échelles mensuelles. Smakhtin et Hughes (2006).

PNR , est la précipitation nécessaire pour la récupération du déficit accumulé depuis le début d'une période de sécheresse, elle provient de la précipitation efficace mensuelle PE qui est calculé comme suit :

$$EP = \sum_{m=1}^n \left[\left(\sum_{i=1}^m P_i \right) / m \right] \quad (3.11)$$

À titre d'exemple pour $m = 3$, pour le premier mois nous pouvons calculer le EP comme suit :

$$EP = \left(\frac{P_1}{1} + \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \right) \quad (3.12)$$

D'où P1 est la précipitation dans le mois courant et P2, P3 sont celles enregistrées durant les deux mois qui précèdent, puis on calcul la moyenne de chaque mois \overline{EP} et nous aurons : $DEP = EP - \overline{EP}$ (3.13)

Ensuite nous passons par le calcul des PNR

$$PNR = DEP / \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (3.14)$$

La somme des $\frac{1}{i}$ est la somme des réciproques de tous les mois, c'est-à-dire pour le $n = 3$ mois le calcul sera :

$$PNR = \frac{DEP}{\left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right)} \quad (3.15)$$

Et au final après avoir déterminé l'écart type de PNR nous pourrons calculer les valeurs de EDI :

$$EDI = PNR/\delta_{PNR} \quad (3.16)$$

3.3.6. L'indice des déciles « ID »

Cette notion a été développée par Gibbs et Maher (1967) qui permet de connaître la fréquence d'un événement de sécheresse. En effet, les déciles sont utilisés comme indicateur de sécheresse, sa méthode consiste à ranger les totaux mensuels de précipitations dans un ordre croissant et construire par la suite une distribution de fréquence cumulée.

Ensuite, la distribution sera divisée en 10 parts (déciles) Smakhtin et Hughes (2006). Les 10 % des valeurs les plus basses sont classées dans l'intervalle du décile 1, les 10 % des valeurs suivantes dans l'intervalle du décile 2, et ainsi de suite jusqu'au décile 10 qui correspond au 10 % des valeurs les plus élevées. Il est très commun de transformer les dix déciles seulement en cinq c'est-à-dire au lieu d'utiliser un décile pour 10 % de valeur pour la première classe il sera à la place deux déciles représentent 20 % et une seule classe ce qui donnera en tout cinq classes. Le calcul des déciles nécessite tout de même une série de données pluviométriques relativement longue.

3.3.7. L'indice de reconnaissance de sécheresse « RDI »

L'indice RDI est calculé tout d'abord en trois étapes (Vangelis et al. 2011 ; Tigkas et al. 2015) et devient tout à fait semblable au calcul de SPI, en premier lieu, la série temporelle mensuelle du rapport α_k entre la précipitation cumulée et l'évapotranspiration potentielle PET cumulé à l'échelle de temps sélectionnée k et α_k est calculé comme suit

$$\alpha_k^i = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, \quad i = 1 \text{ à } N \quad (3.17)$$

D'où P_{ij} et PET_{ij} sont la précipitation et l'évapotranspiration potentielle d'un mois "j" pour une année hydrologique "i", commence par le mois de septembre et N la période ou la longueur de la série temporelle. Puis le RDI est normalisé (RDI_n) en suivant l'équation :

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_k^{(i)}}{\bar{a}_k} - 1 \quad (3.18)$$

Dans la présente étude le RDI standardisé (RDI_{st}) a été calculé en ajustant la fonction de densité de probabilité gamma définie dans l'équation 1 à la distribution de fréquence de a_k (Tigkas et al. 2015). D'autres lois peuvent très bien être utilisées à l'exemple de log normal (Mosaedi et al. 2015).

Les séries temporelles de RDI ont été calculées à l'aide du logiciel DrinC (Drought Indices Calculator) (Tigkas et al. 2015), qui comprend également un outil de calcul SPI, utilisé avec succès par Surendran et al. (2017) pour l'Inde.

Le tableau ci-après résume les classes des conditions sèches pour chaque indice utilisé, six indices de huit précités ont la même classification il s'agit bien de SPI- Z-score, CZI-MCZI, EDI et RDI. Nous pouvons aussi inverser les valeurs pour voir les classes des évènements humides.

Tableau 3.6. Les classes des évènements secs pour chaque indice

Indice	Classe de sécheresse			
	Légère	Modérée	Sévère	Extrême
SPI	De 0 au -0.99	De -1 au -1,49	De -1,5 au -1.99	≤ -2
Z-score				
CZI				
MCZI				
EDI				
RDI				
PNI	81 à 100	80 à 41	40 à 21	≤ 20
RDDI	50 à 30	30 à 20	20 à 10	≤ 10

(Paulo et al. 2003 ; Wu et al. 2001 ; Smakhtin et Hughes, 2006 ; Nikbakht et al. 2013, Dogan et al. 2012 ; Baruna et al.2010)

3.4. Processus Markovien

Les processus stochastiques (ou aléatoires) permettent de modéliser des systèmes dont le comportement n'est que partiellement prévisible, citons à titre d'exemple ; les suites de variables aléatoires IID (Indépendantes identiquement distribuées), mais du point de vue « modélisation » elle ne prenant pas en compte la dynamique des systèmes en évolution, du fait de l'indépendance. Pour introduire cette dynamique, il faut tenir compte de l'influence du passé et c'est ce qu'ils font les chaînes de Markov, à la façon des équations de récurrence dans les systèmes déterministes. Sa théorie en général est fondée sur le calcul des probabilités.

Une chaîne de Markov (Cinlar, 1975) est un processus stochastique X_t utilisé dans plusieurs domaines pour modéliser les séries chronologiques qui sont des variables aléatoires telque les indices de sécheresse (Seyed et Davar 2013), ce processus a la particularité que la valeur X_{t+1} dans un temps t+1 est conditionnellement indépendante de $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}$ et ne dépend seulement de la valeur X_t de temps t pour premier ordre.

Une chaîne de Markov est caractérisée par un ensemble des états S et par une probabilité de transition P_{ij} entre les états (Paulo 2007). Le processus est du premier ordre quand l'état X_{t+1} dépend seulement de l'état précédent X_t et il demeure d'ordre deuxième quand l'état X_{t+1} dépend des deux états précédents X_t et X_{t-1} .

3.4.1. Définition mathématique

Une chaîne de Markov est une suite de variables aléatoires $(X_n, n \in \mathbb{N})$ qui permet de modéliser l'évolution dynamique d'un système aléatoire : X_n représente l'état du système à l'instant n . La propriété fondamentale des chaînes de Markov, dite propriété de Markov, est que son évolution future ne dépend du passé qu'au travers de sa valeur actuelle. Autrement dit, conditionnellement à $X_n, (X_0, \dots, X_n)$ et $(X_{n+k}, k \in \mathbb{N})$ sont indépendants.

Si pour tout entier $n \geq 0$ et tous états $i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i, j \in E$,

$$P(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j \mid X_n = i). \quad (3.19)$$

Le processus $\{X_n\}_{n \geq 0}$ est appelé chaîne de Markov. Celle-ci est dite homogène si le second membre de l'équation ne dépend pas de n (Brémaud 2009).

3.4.2. Application des chaînes de Markov pour la prévision de la sécheresse

Le modèle des chaînes de Markov a été appliqué sur les valeurs de l'indice SPI pour tenter de déterminer et de prévoir les différentes probabilités d'apparition de sécheresse. En effet, dans le but d'estimer la probabilité d'avoir une année avec des conditions sèches après une année sèche ou humide nous sommes basés sur le SPI de 12 mois.

Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état d'une année précédente à l'état de l'année en cours c'est-à-dire, le modèle tient en compte de la liaison entre les états des années successives. En effet l'état de l'année k ne dépend que de l'état de l'année $k-1$ pour un processus de Markov de premier ordre et il dépend des états $k-1$ ainsi $k-2$ pour le processus de Markov de deuxième ordre, on appelle ça respectivement ; un processus de Markov d'ordre I et un processus de Markov d'ordre II. On peut aller jusqu'à l'ordre h si l'état de l'année k dépend des $k-1, k-2, k-3, \dots, k-h$ des états des années précédentes.

L'état de l'année ou de la saison peut être définie en se basant sur les valeurs de SPI ;

SPI de 12 mois comme nous l'avons susmentionnée caractérise l'échelle annuelle et celui de 3 mois pour l'échelle saisonnière. De ce fait l'état de SPI dans un temps t peut être déterminé par l'un des deux cas ;

1- état 0 : présence de la sécheresse ; $(SPI < 0)$

2- état 1 : absence de la sécheresse ; $(SPI \geq 0)$.

Il est possible de prendre en compte les différentes classes de sécheresse et même d'humidité, dans ce cas à la place d'avoir deux états y aurait un nombre plus important d'états dépend de classes que nous choisissons. L'exemple du travail de Paulo et al. (2007) qui ont étudié la probabilité de transition d'une classe de sécheresse à une autre.

Dans la présente étude nous avons tenu en compte les états, sec et non sec le principe sera donc comme suit

Pour le processus de Markov d'ordre I :

Quatre situations sont possibles dans ce cas à savoir : S-S (deux années sèches successives), S-NS (une année sèche suivie d'une année non sèche), NS-S (une année non sèche suivie d'une année sèche), NS-NS (deux années non sèches successives).

Pour le processus de Markov d'ordre II :

Dans ce cas, l'état de l'année k dépend de l'état de l'année k-1 et de l'année k-2. En revanche on s'intéresse particulièrement aux années sèches successives. Ce choix va de soi avec l'étude de la persistante de la sécheresse : S-S-S (trois années sèches successives), S-SNS (deux années sèches successives), NS-S-S (deux années sèches successives), NS-S-NS (une année sèche isolée).

L'application des chaînes de Markov d'ordre I et II à l'échelle annuelle et saisonnière a été élaboré sur l'ensemble de sept plaines du Nord-est Algérien cela en utilisant tout d'abord la méthode des polygones de Theissen sur les 123 stations pluviométriques pour déterminer une moyenne représentative pour chaque plaine.

3.5. L'indice d'aridité et l'indice de concentration des précipitations

3.5.1. L'indice d'aridité (IA)

L'aridité est un phénomène climatique basé sur les conditions climatiques moyennes d'une région, définie essentiellement par la pénurie d'humidité (Agnew et Anderson 1992). Une distinction fondamentale existe entre l'aridité, qui est un phénomène climatique à long terme et les sécheresses, qui sont un phénomène temporaire lié à un déficit hydrique. Thornthwaite (1948) a reconnu que le fait qu'un climat soit humide soit sec dépend à la fois de la quantité de précipitations et de la quantité d'eau nécessaire pour compenser l'évaporation et la transpiration des plantes, ce qu'on appelle collectivement évapotranspiration (ET). En d'autres termes, l'aridité est en fonction à la fois de la précipitation et du taux d'évapotranspiration potentielle (ETp). D'autres facteurs influant sur l'aridité à savoir la température et le calendrier annuel des précipitations.

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau transférée à l'atmosphère qui serait possible sous des conditions idéales d'humidité du sol et de végétation (Thornthwaite 1948). Penman (1948, 1956) définit plus précisément l'évapotranspiration potentielle comme «la quantité d'eau transpirée dans un temps donné par une culture verte courte, couvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et avec un état hydrique adéquat dans le profil du sol».

L'indice d'aridité est basé sur le rapport de précipitations P et le taux d'évapotranspiration potentielle ETP

$$IA = \frac{P}{ETP} \quad (3.20)$$

D'où l'ETP est calculé avec la méthode de Thornthwaite (1948) comme suit

$$ETP = 16 \left(\frac{L}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10T_a}{I}\right)^\alpha \quad (3.21)$$

D'où :

T_a : est la température moyenne quotidienne du mois calculée

N : le nombre de jours du mois calculé

L : est la durée moyenne du jour (heures) du mois calculé

$$\alpha = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 49239 \quad (3.22)$$

$$I \text{ Indice thermique annuel } I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{ai}}{5}\right)^{1.514} \quad (3.23)$$

Les résultats de l'indice d'aridité ont été cartographiés afin de montrer les différents types de climat existant dans la région en se basant sur la classification de l'UNESCO (1979).

Tableau.3.7 Les différentes classes d'aridité (Razei et al. 2013)

Classification	Indice d'aridité
Hyper aride	IA < 0.08
Aride	0.08 < IA < 0.20
Semi-aride	0.2 < IA < 0.5
Subhumide sec	0.5 < IA < 0.65
Subhumide	0.65 < IA < 1
Humide	1 < IA

3.5.2. L'indice de concentration des précipitations

L'indice de concentration des précipitations ICP sert à exprimer la variabilité saisonnière et annuelle des précipitations en % dans la série. Les faibles valeurs d'ICP inférieurs à 10 indiquent une distribution uniforme des précipitations au cours de l'année

tandis que les valeurs de 11 à 20 indiquent la saisonnalité dans la répartition des précipitations. Les valeurs supérieures à 20 correspondent à des climats avec une variabilité mensuelle importante des quantités de pluie il se calcule comme suit:

$$ICP = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} p_i)^2} \cdot 100 \quad (3.24)$$

Où p_i : est la précipitation mensuelle

Oliver (1980) a assemblé la classification suivante pour caractériser la distribution mensuelle des précipitations dans l'année :

Tableau 3.8. Classification de l'indice de concentration des précipitations ICP (Oliver 1980)

Classe	ICP	distribution
1	0.8 -10	Uniforme
2	11 – 15	Saisonnalité Modérée
3	16 – 20	Saisonnalité
4	21 – 50	Saisonnalité élevée
5	51 - 100	Irrégulière

3.6. L'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans la région Nord-est Algérienne a été élaborée en se basant sur l'analyse en composantes principales, qui est une méthode descriptive multidimensionnelle très connue. L'ACP permet de fournir des données décrites par un grand nombre de variables quantitatives expliquées par des composantes principales prises. C'est une méthode d'analyse factorielle dans laquelle des nouvelles variables non corrélées sont formées et qui sont des combinaisons linéaires des variables originales (Sharma, 1996).

Les données qui seront soumises à cette technique d'analyse dans la présente étude, sont les séries de variables des deux indices de sécheresse SPI et RDI calculés à trois différentes échelles de temps 3, 6 et 12 mois, dans le but de bien déterminer la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse avec ces indices.

Cette méthode comme d'autres peuvent être employées pour identifier les régions homogènes touché par la sécheresse, plusieurs auteurs ont utilisé avec succès cette méthode citons (Núñez et al. 2011 ; Meddi et al. 2013 ; Moreira et al. 2013 ; Goyal et Sharma 2016).

L'ACP est obtenu en calculant la matrice de covariance des données de SPI et RDI avec les valeurs propres et les vecteurs propres correspondants (Rencher, 1998). Les valeurs propres fournissent la quantité de variance expliquée par chaque nouvelle variable et les vecteurs propres donnent des informations sur le poids que les données originales ont dans les

composantes nouvellement formées, ils représentent également la corrélation entre les données d'origine et la série chronologique de composantes principales correspondantes.

L'ACP peut être calculé en plusieurs modes, à savoir l'ACP en mode R et en mode S (Richman, 1986), qui diffèrent sur le type de données utilisées et la façon dont ces données sont organisées en tant que matrice d'entrée pour ACP. Le mode S est utilisé pour identifier la variabilité de la sécheresse dans la région et permet d'assimiler la co-variabilité entre les stations d'un indice de sécheresse donné. En effet, l'ACP en mode S a été appliquée sur 123 séries de SPI à l'échelle de temps 3, 6 et de 12 mois et séparément les 123 séries pour l'indice RDI aux mêmes échelles de temps; c'est-à-dire que nous allons effectuer l'ACP en mode S six fois, un pour chaque indice. La qualité d'ACP a été testée à l'aide de la statistique Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Sheskin, 2007), tandis que la décision sur le nombre de composantes à retenir a été faite en utilisant la règle de North (North et al. 1982) en considérant le degré de confiance choisi de 95%.

La rotation Varimax est une méthode orthogonale utilisée pour maximiser la variance entre les poids de chaque composante principale, elle est appliquée pour obtenir des répartitions spatiales beaucoup plus localisées avec une variabilité indépendante de la sécheresse (Raziei et al. 2009). Les composantes principales sont calculées dans un ordre décroissant d'importance ; la première composante explique la variance maximale possible des données totales, la deuxième explique la variance maximale non encore expliquée, ce qui signifie que la dernière composante est celle qui contribue le moins à expliquer la variance des données originales.

Les résultats pour chaque indice et chaque composante retenue ont été cartographiés pour montrer la variabilité spatiale de la sécheresse à travers la région. L'application de l'analyse en composantes principales s'est basée sur le logiciel R.

3.7. Test de tendance de Mann-Kendall modifié

Le Mann-Kendall est un test non paramétrique qui vérifie l'hypothèse nulle qu'une série temporelle donnée n'a pas de tendance monotone. C'est le résultat d'une amélioration du test étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) et optimisé par Hirsch (1982, 1984). Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies, il s'appuie sur le calcul du taux de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons. Le test de tendance de Mann-Kendall modifié (MMK) (Hamed et Rao, 1998 ; Yue et Wang 2004) a été appliqué

aux scores (résultats) des composantes principales retenues pour les indices SPI et RDI de chaque échelle de temps considérés.

Il a été appliqué à la série chronologique de la valeur moyenne annuelle et à la série temporelle relative à chaque mois des scores CP de RDI et de SPI pour toutes les échelles de temps, considérant que les séries temporelles sont auto-corrélées, le Mann-Kendall modifié a été adopté à la place du test MK original dans cette étude avec un degré de confiance de 95%.

Le test de Mann-Kendall modifié, utilisé pour déterminer la signification d'une tendance dans une série temporelle, combiné avec l'estimateur de pente de Sen (Sen, 1968) pour obtenir la magnitude de la tendance des scores des composantes principales obtenues pour chaque région.

Conclusion

L'analyse et le traitement des données ont permis de prendre en considération 123 stations pluviométriques, les lacunes dans les séries ont été comblées, en faisant appel au programme Hydrolab, basé sur l'analyse en composantes principales. La vérification de l'homogénéité a montré l'existence des valeurs aberrantes dans 22 stations qui ont été ensuite corrigées à l'aide des méthodes de double et de simple cumul.

Le passage par cette étape est indispensable dans le but d'avoir des séries chronologiques fiables et de qualité. Encore, pour plus de détails sur le comportement de l'ensemble de données, quatre tests ont été utilisés pour la détection des ruptures, il s'avère qu'il existe deux ruptures bien remarquables et évidentes, la première surgie au début des années 1970 tandis qu'une deuxième plus marquante détectée en 2001.

Les différents indices de sécheresse utilisés dans cette étude, ont chacun une méthode de calcul bien distincte, cependant l'indice SPI et celui de RDI emploient les mêmes étapes dans leurs calculs, la seule différence c'est que le SPI a uniquement comme données d'entrée (impute) les précipitations tandis que l'indice RDI utilise le ratio précipitation, évapotranspiration potentielle.

La prévision de la sécheresse et de son comportement dans la région sera faite sur la base du processus Markovien, ce dernier estime les probabilités d'apparition de phénomènes pour différentes situations possibles, cette étape est focalisée plutôt sur sept plaines les plus vastes de la zone où le processus Markovien d'ordre I et II à l'échelle annuelle et saisonnière est appliqué. D'autres méthodes et techniques peuvent être utilisées en parallèle dans le but d'acquérir des résultats complémentaires et une compréhension plus approfondie. Pour cela nous avons opté à l'analyse des tendances de sécheresse pour avoir une meilleure connaissance sur la variabilité de cet événement dans la région d'étude.

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse a été élaborée en se basant sur l'analyse en composantes principales (ACP) avec rotation Varimax en S-mode. Les séries soumises à cette technique, sont les variables des deux indices SPI et RDI calculés à trois différentes échelles de temps 3, 6 et 12 mois.

Au final, le test de tendance de Mann-Kendall modifié (MMK) a été appliqué aux scores (résultats) des composantes principales retenues des deux indices pour chacune des échelles de temps considérées, pour déterminer la signification d'une tendance dans nos séries temporelles, combiné avec l'estimateur de pente de Sen (Sen 1968) pour obtenir la magnitude de la tendance des scores des composantes principales obtenues pour chaque région.

Chapitre 4

Résultats et discussions

Introduction

La sécheresse est un phénomène climatique caractérisé par des précipitations persistantes inférieures à la normale où la fréquence, la durée et la sévérité sont toujours difficiles à connaître. Cet évènement peut affecter une région de différentes manières commençant par réduire la disponibilité des ressources en eau ce qui met en alerte par conséquent la production agricole ainsi que l'ensemble des secteurs économiques.

L'objectif de cette étude est l'analyse et la prévision de la sécheresse dans le Nord-est Algérien, une région vaste connue par ses réservoirs d'eaux naturel (les nappes) et artificiels (les barrages) ainsi que par ses plaines productives très étendues.

Cependant, l'Algérie est confrontée à plusieurs séquences de sécheresse persistantes avec des effets très néfastes sur l'agriculture et les ressources en eau, notamment depuis les dernières décennies, par contre l'intensité et la persistance de ces épisodes varient d'une zone à autre.

Pour mener à bien notre travail, ce dernier chapitre analyse les différents résultats trouvés et cela en cinq parties distinctes ;

- 1- L'étude et l'analyse de la sécheresse entre la période 1960-2014 en utilisant l'indice SPI-12 ;
- 2- La comparaison de sept indices de sécheresse qui prennent en compte uniquement les précipitations comme données, application sur sept plaines de la région ;
- 3- La prévision de la sécheresse en utilisant le modèle Markovien sur sept plaines du Nord-est Algérien ;
- 4- La comparaison entre l'indice SPI et celui de RDI appliqués à l'échelle locale sous l'influence du climat ;
- 5- L'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse basée sur les indices SPI et RDI à différentes échelles de temps.

4.1. Analyse de la sécheresse entre la période 1960-2014 en utilisant l'indice SPI-12

L'indice de précipitations standardisé SPI de 12 mois a été employé sur les 123 stations pluviométriques de la région Nord-est Algérienne afin d'analyser le comportement et la variabilité spatiale de la sécheresse pour la période étalant de l'année hydrologique 1960-1961 au 2013-2014.

Les résultats cartographiés, montrent l'existence de plusieurs périodes de sécheresse de différents degrés qui ont touché l'ensemble de la région, en divisant la période d'étude en décennie, nous pouvons récapituler les remarques suivantes en se basant sur la classification :

ES : Extrêmement sèche ; **SS** : Sécheresse Sévère ; **SM** : Sécheresse modérée ; **SL** : Sécheresse légère ; **HL** : Humidité légère ; **HM** : Humidité modérée ; **TH** : Très humide ; **EH** : Extrêmement humide.

4.4.1. La décennie de l'année hydrologique 1960-61 au 1969-70 figure (4.1)

L'année hydrologique 1960-61 a enregistré une sécheresse modérée sur la totalité de la région et beaucoup plus sévère dans la plaine d'Annaba, après deux années moyennement humides une légère sécheresse a commencé de s'installer seulement au Nord en 1963-64 et elle devenu plus sévère en 1964-65 particulièrement dans la région de Soummam. Depuis, une alternance entre des périodes de sécheresse légères et des périodes humides ont caractérisées la région jusqu'à l'année 1969-70 où le degré extrême humide a été noté sur la majorité de la région.

4.4.2. La décennie de l'année hydrologique 1970-71 au 1979-80 figure (4.2)

Cette décennie a connu des sécheresses beaucoup plus sévères que la précédente.

Cependant, après l'année hydrologique 1969-1970 qui a été très humide, une légère sécheresse a surgi principalement dans la partie Est, ensuite deux années moyennement humides à très humides réparties dans la zone ont succédé.

En 1973-74 une sécheresse modérée dans tout le Sud et sévère beaucoup plus à l'Est a été marqué, tandis que la région de Soummam semble épargnée. Ensuite, la sévérité a bien diminué aux années d'après jusqu'au 1977-78, où un autre épisode de sécheresse sévère a touché les plaines du la partie Ouest particulièrement celles de Setif et de Batna et moins sévère aux plaines d'Outaya et d'el Hodna. Cet épisode a continué de persister pendant deux années de suite d'une manière légère à modérer à la plaine d'Outaya, tandis que les régions Est étaient plus ou moins épargnées. Cette décennie, semble être caractérisée par une sécheresse sévère persistante, cela peut être également expliqué par la rupture détectée dans cette période montré au chapitre précédent.

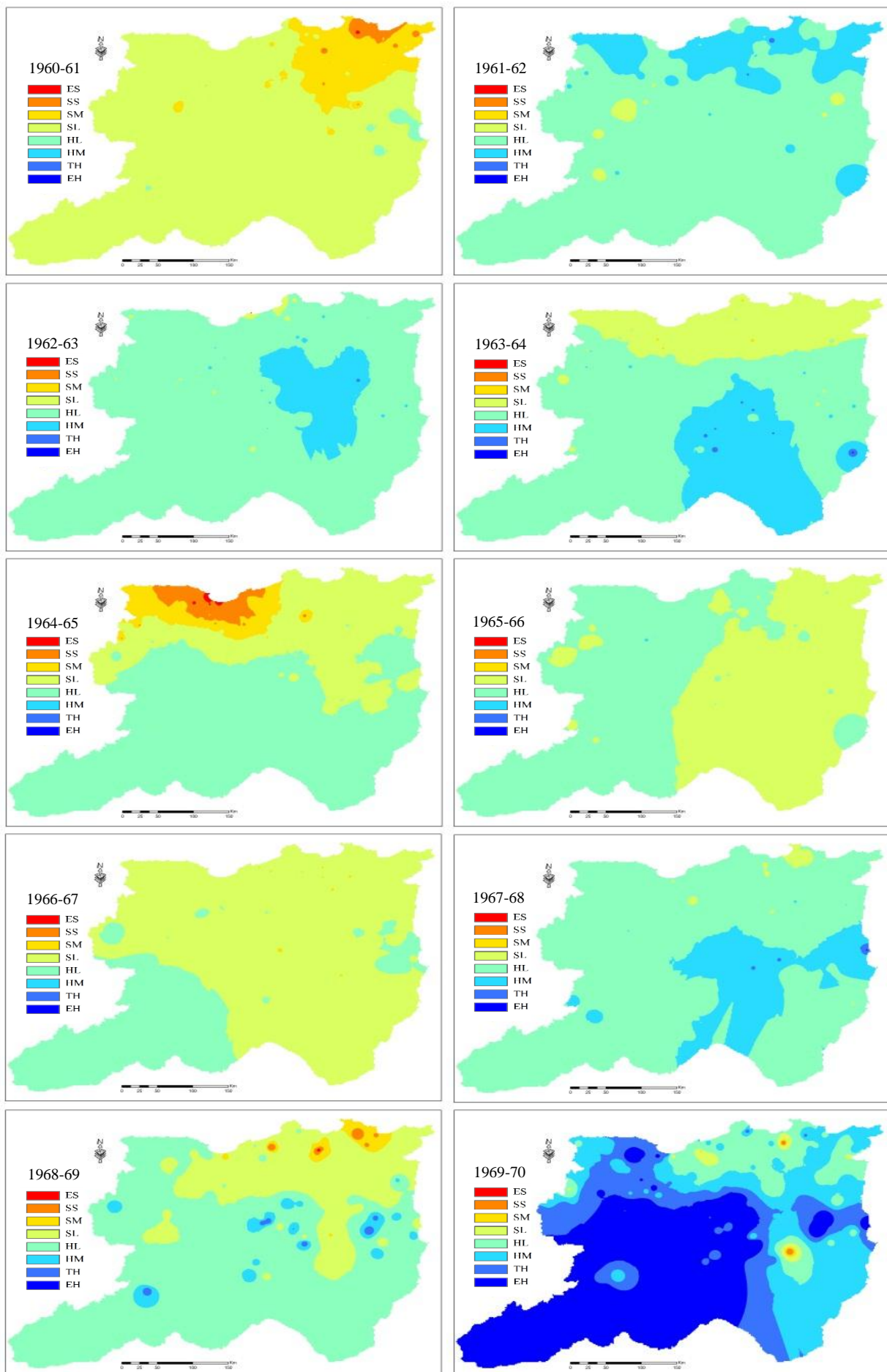


Fig. 4.1 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1960-61 au 1969-70

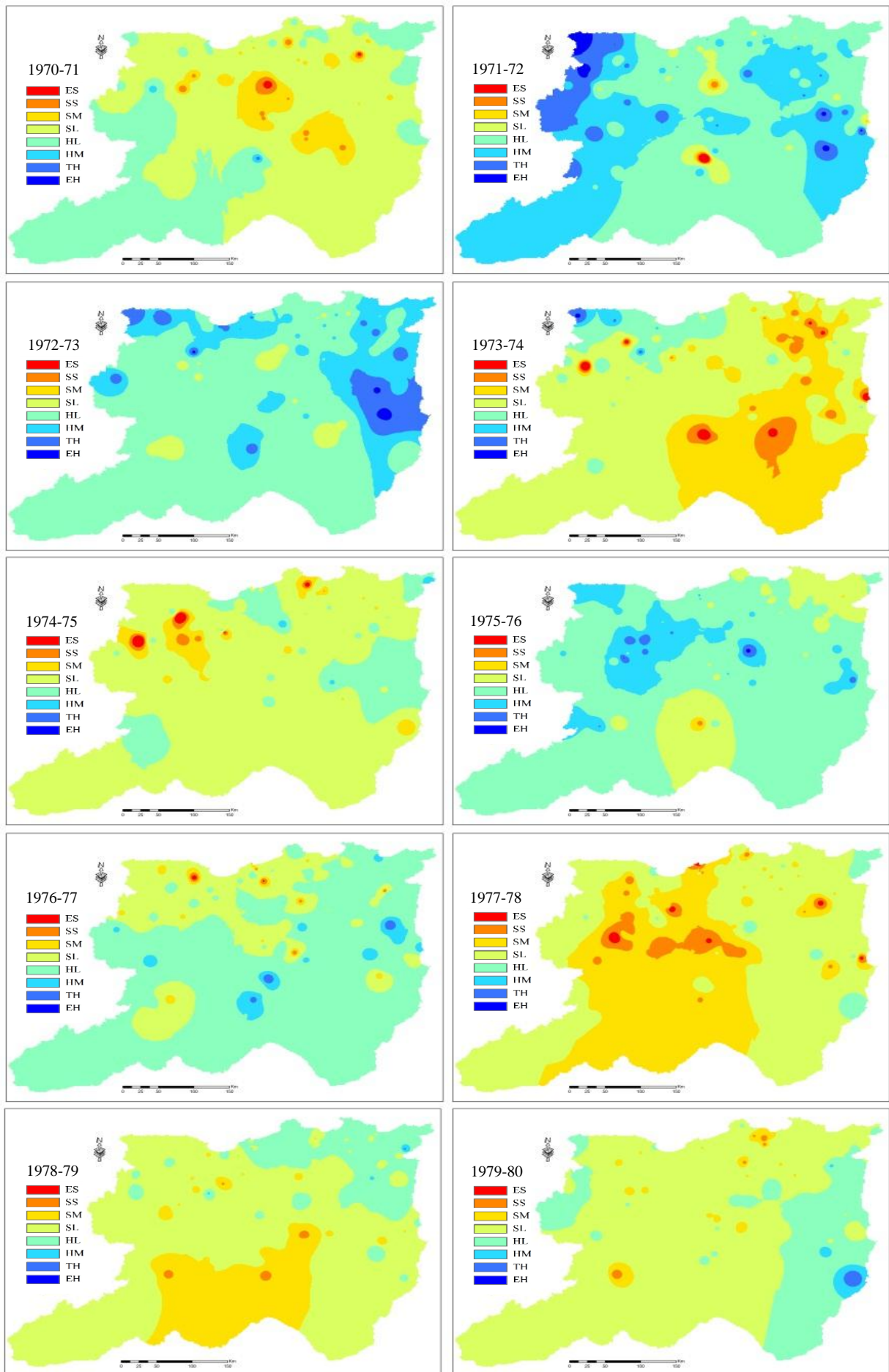


Fig. 4.2 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1970-71 au 1979-80

4.4.3. La décennie de l'année hydrologique 1980-81 au 1989-90 figure (4.3)

Les deux premières années de cette décennie étaient très similaires dans lesquelles on note une sécheresse légère qui se focalise plus particulièrement au Sud-ouest et elle persiste jusqu'à l'année qui suit.

Cette même région était caractérisée par une sécheresse extrême lors de l'année hydrologique 1983-84 qui s'étend jusqu'au centre. C'est ainsi la première fois dans cette période d'étude qu'on enregistre une sécheresse avec un tel degré et une telle étendue, bien que la partie Nord n'ait pas été touchée.

Cependant, cette sévérité n'a pas vraiment persisté de la même amplitude, on note quand même que la partie sud et essentiellement le Sud-ouest a été constamment affecté par ce phénomène durant toute la décennie si mise à part la dernière année.

Il est constaté également, une sécheresse qui s'installe de plus en plus au Nord atteignant son maximum de sévérité dans les plaines de Jijel dans les deux années 1987-88 et 1989-90.

En général, la zone du Nord était beaucoup plus à l'abri par rapport aux autres dans cette décennie.

4.4.4. La décennie de l'année hydrologique 1990-91 au 1999-2000 figure (4.4)

Cette décennie a été caractérisée par deux premières années ayant des conditions plus ou moins normales c'est-à-dire la première année une sécheresse légère s'est manifesté seulement dans la zone Ouest alors que le côté Est été légèrement humide, cette humidité légère s'est propagé sur la majorité de territoire l'année d'après.

Ensuite, la troisième année la sécheresse légère a contourné toute la région et elle s'est aggravé en 1993-94 de légère à modérer jusqu'au sévère dans les plaines de l'extrême Est celles de Tébessa et Meskiana.

La sévérité est partie l'année d'après, où les conditions humides commencent à surgir surtout en 1995-96 sur l'ensemble de la région.

En 1996-97, une sécheresse sévère à succomber toute la région avec un degré encore plus extrême dans la région de Soummam et une grande partie de la plaine de Meksiana.

Cette sécheresse intense n'a pas persisté puisqu'une année normale et deux années moins sévères dans la majorité de la région ont pu succéder.

Notons quand même qu'au 1998-99 une sécheresse sévère a touché les plaines de Sud et elle a franchi le Nord-ouest de la région dans l'année d'après.

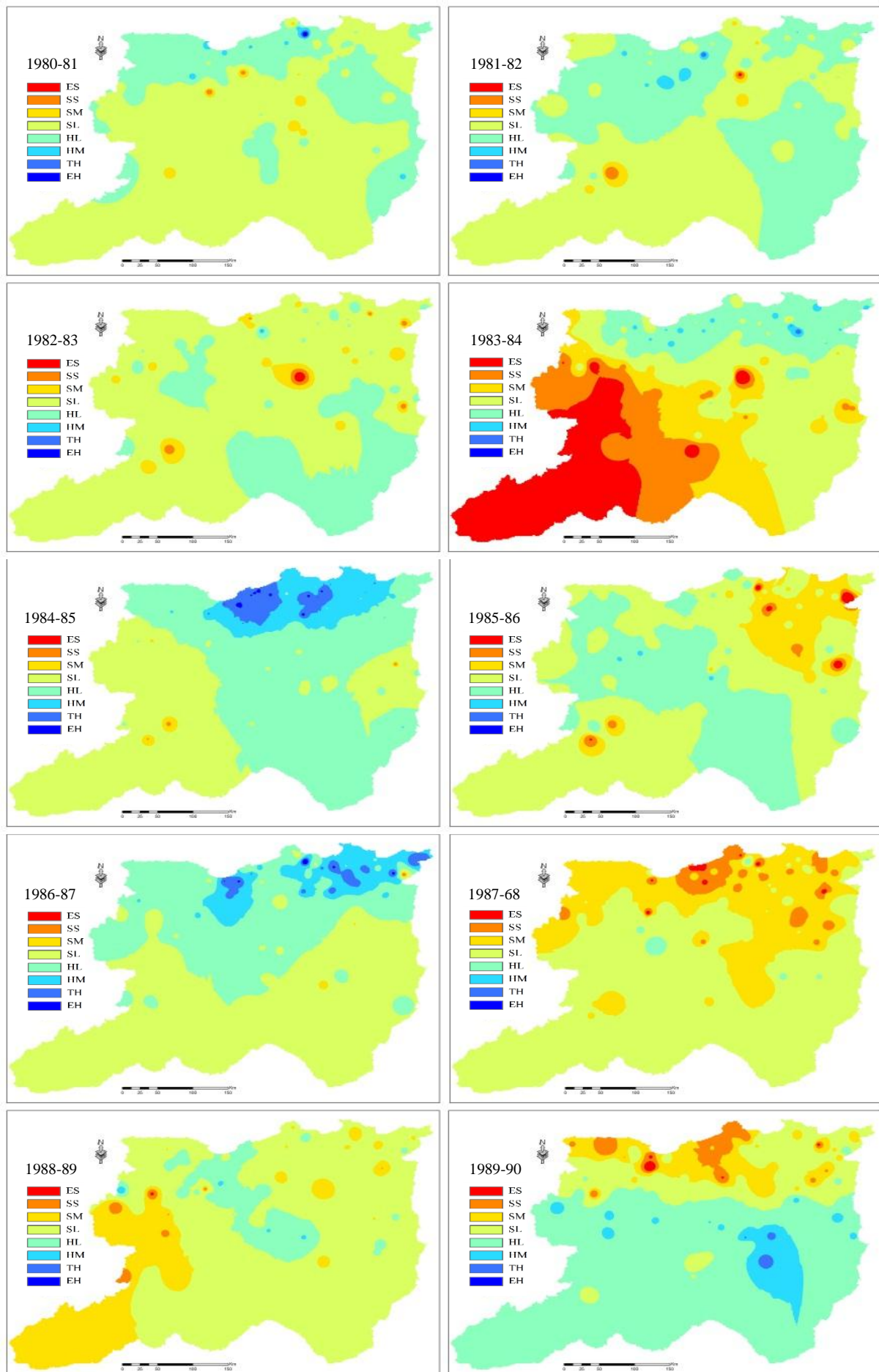


Fig. 4.3 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1980-81 au 1989-90

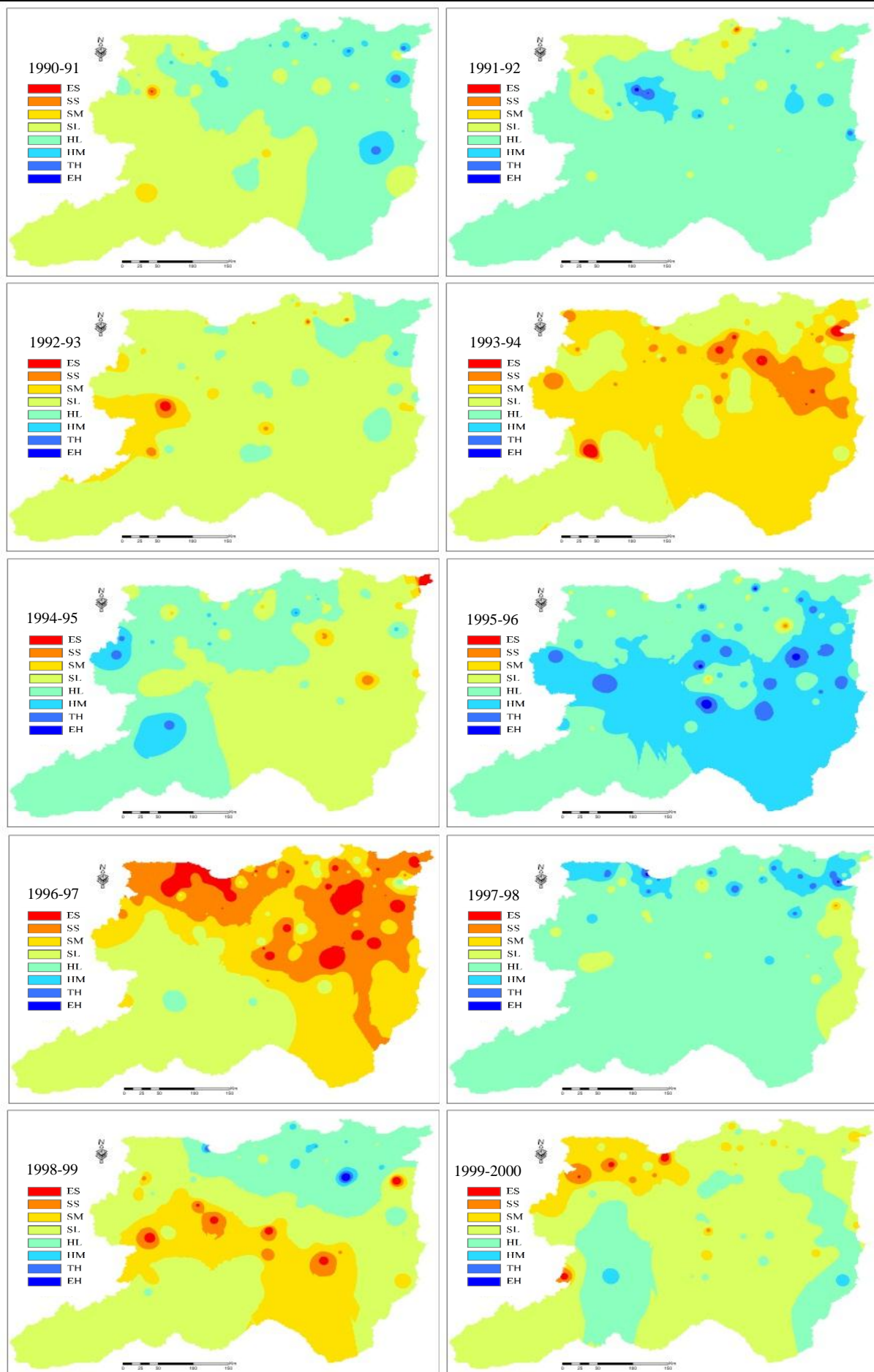


Fig. 4.4 Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 1990-91 au 1999-2000

4.4.5. De l'année hydrologique 2000-01 au 2013-14 figure (4.5a, b)

Les deux ultimes années de la précédente décennie étaient caractérisées par une légère sécheresse, néanmoins cette sécheresse a continué de persister durant encore deux autres années de la présente décennie.

Dans l'année hydrologique 2000-01, une sécheresse sévère s'est étendue sur la moitié de la région et avec encore un degré plus extrême dans la plaine de Tébessa, tandis qu'en 2001-02 cette sévérité extrême s'est concentrée beaucoup plus au Nord, plus exactement sur la région côtière et sur la plaine de Sétif.

Depuis cette sécheresse très rude de 2001 qui concorde exactement avec la rupture détectée dans la partie étude des ruptures dans les séries au chapitre précédent, le régime ensuite s'est stabilisé et une humidité légère à modérer à continuer de caractérisé la région tout le reste de la période, en enregistrant un petit régime sous la normale une année à l'Ouest puis une fois au Nord après au Centre et au finale à l'Est respectivement en 2004-05 , 2005-06 2006-07 et 2007-08.

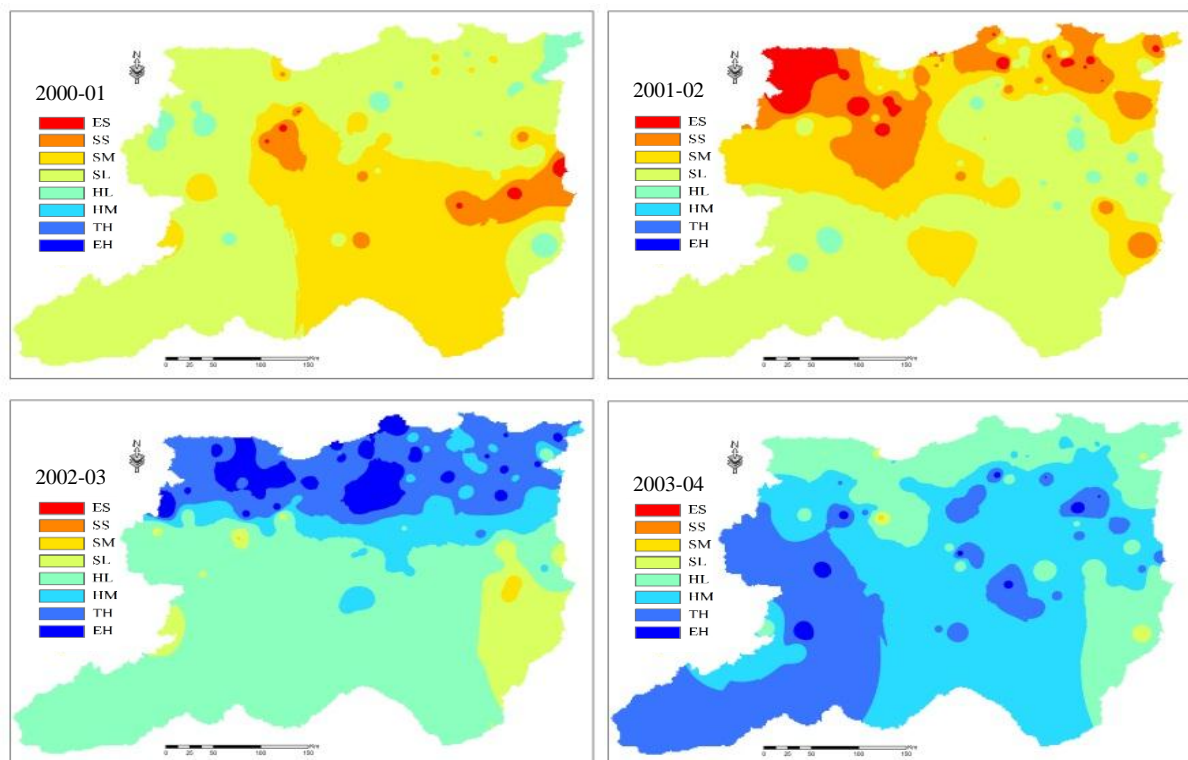


Fig. 4.5a Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 2000-01 au -2003-04

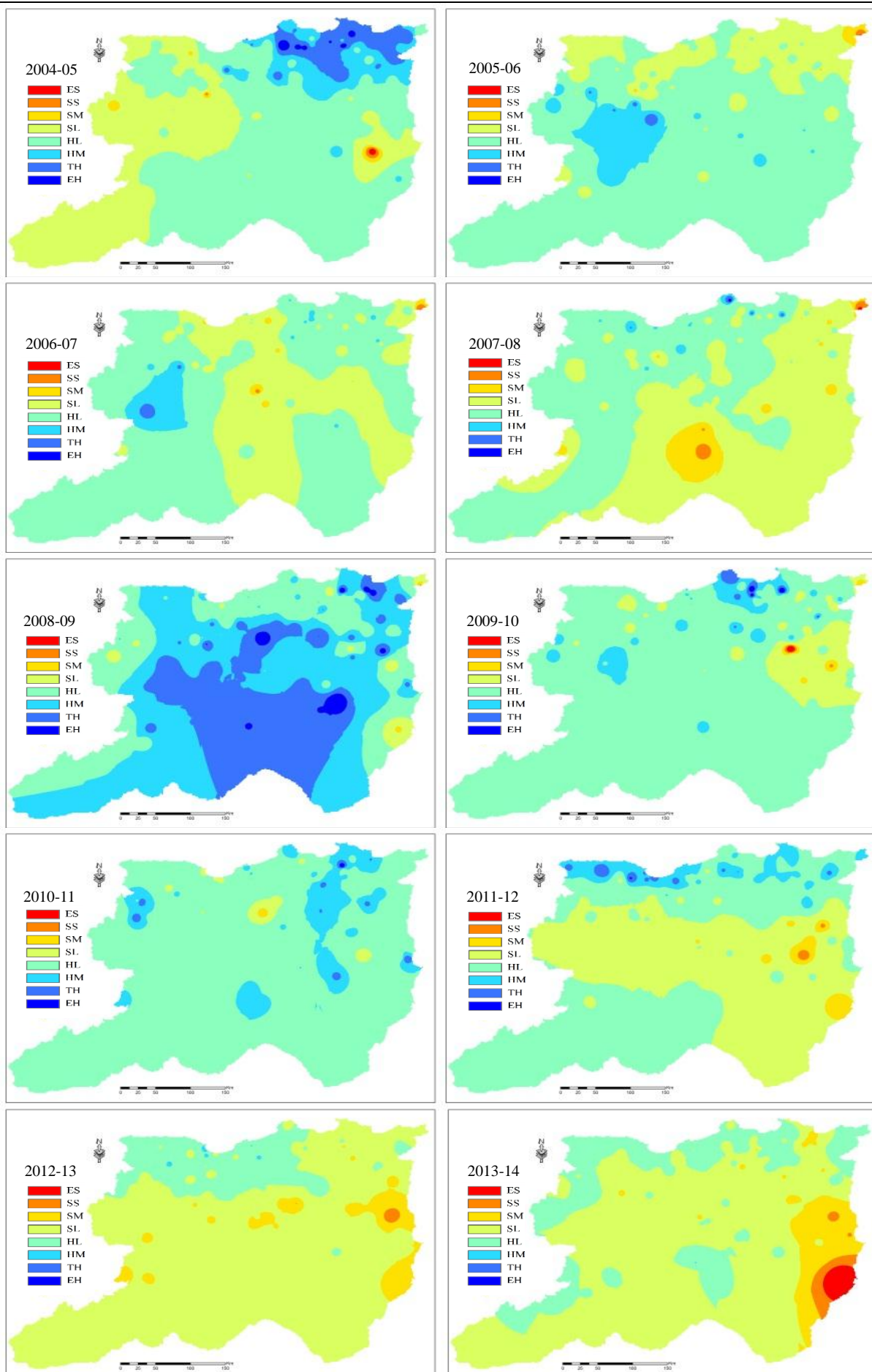


Fig. 4.5b Résultats de l'application de SPI-12 sur la région Nord-est entre l'année hydrologique 2004-05 au -2013-14

4.2. Comparaison de sept indices de sécheresse, application sur sept plaines du Nord-est Algérien

4.2.1. Méthode des polygones de Thiessen sur les plaines de la région

Dans cette étape, au lieu de prendre arbitrairement des stations représentatives situées sur les sélectives plaines, nous avons jugé utile d'utiliser la méthode classique connue par les polygones de Thiessen afin de l'appliquer sur l'ensemble des 123 stations et à travers les sept plaines pour avoir au final, une moyenne et une station qui représente chacune une plaine, la méthode est illustré dans la figure ci-après.

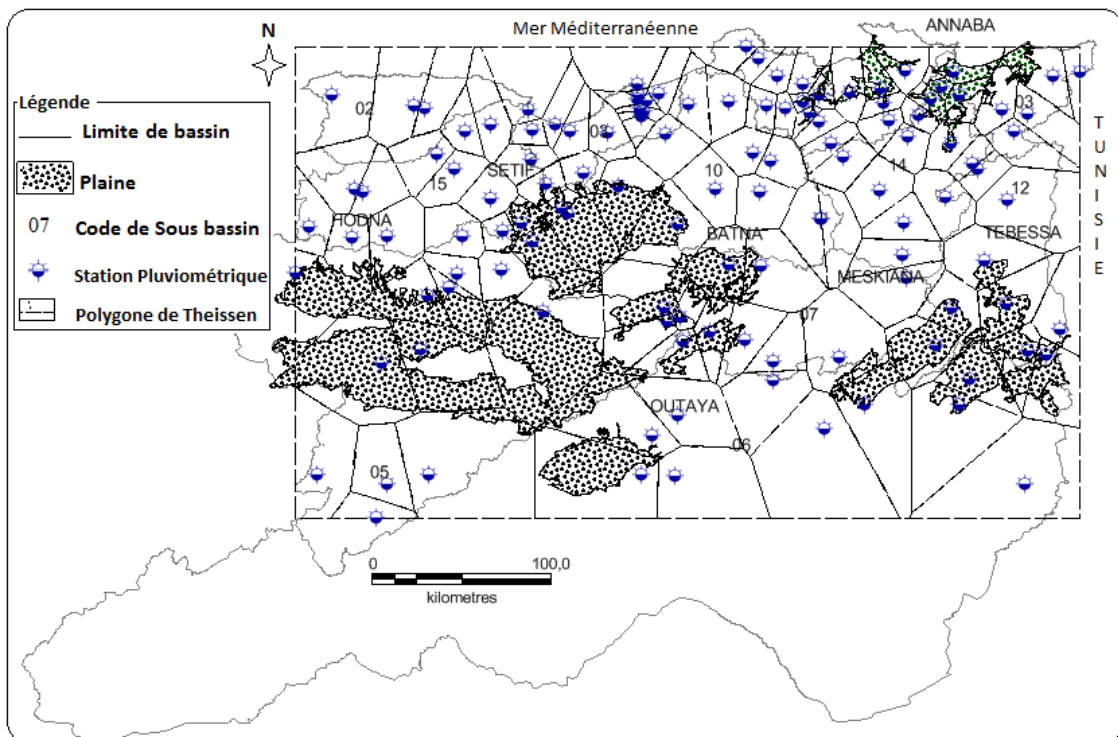


Fig. 4.6 Application de la méthode classique des polygones de Thiessen sur sept plaines de la région.

Cette méthode est purement géométrique et permet d'identifier à partir de la densité de réseau pluviométrique les zones d'influence et la précipitation moyenne. L'utilisation de la méthode sur les 123 stations pluviométriques de la région a conduit au final de prendre en considération uniquement celles qui ont une influence directe sur les sept plaines et qui sont en totales 63 stations. Il existe parmi ces dernières sept stations qui ont une influence sur deux plaines différentes à la fois il s'agit de celles qui se trouvent au champ d'influence de la plaine de Batna et de Setif, (Oued Chelih, Merouana et Tadjenanet), deux stations dans les plaines de Hodna et Setif (Sidi Ouadah et Borj Bou Arreridj) et deux autres stations entre les plaines de Meskiana et Tébessa (Meskiana et Dhalaa), le tableau 4.1 récapitule les détails de surface d'influence de chaque station.

Tableau 4.1 Les caractéristiques des plaines d'étude et les surfaces d'influences de ses stations

Plaine	Superficie totale (Km ²)	Code des Stations d'influence	Superficie d'influence de station
Annaba	1623.70	030906	21.21
		030908	12.82
		030909	59.59
		030911	10.91
		031102	05.04
		031106	81.39
		031201	228.80
		031302	111.89
		031501	62.32
		031601	204.30
		140505	63.18
		140605	16.80
		140606	137.50
		140609	107.30
		140611	245.10
Batna	2109.00	140631	255.50
		051201	83.99
		051203	105.20
		051207	527.40
		061211	192.50
		070305	667.50
		070316	282.60
		070322	141.70
		070410	65.21
Hodna	9501.00	100303	42.87
		051111	2454.00
		051201	81.18
		061211	44.31
		061304	29.90
		061305	417.00
		061416	10.59
		052102	230.40
		050701	1607.00
		050702	2139.14
		050904	130.10
		051005	460.40
		050801	588.60
		150402	85.77
150202	262.10		
Meskiana	1569.90	050101	931.48
		051703	29.11
		061802	01.53
		061804	401.40
		070704	142.70
		120201	254.80
		120202	769.50

Outaya	1298.30	061305	150.10
		061416	1147.00
		061601	01.22
Setif	3709.15	030204	51.64
		030205	33.31
		050904	19.26
		051111	272.20
		100110	693.60
		100303	642.80
		150607	960.30
		150608	147.50
		150614	630.60
		150707	228.80
		150801	28.48
		150802	0.66
Tébessa	2411.19	120402	161.50
		120318	437.70
		120504	10.11
		120201	27.48
		120301	522.50
		062301	646.00
		062308	185.40
		120202	32.80
120307	387.7		

Il est constaté que la plaine la plus étendue est bien celle de Hodna atteignant plus de 9500 km² de superficie et représenté par le plus grand nombre de station (16), tandis que la plaine la moins vaste s'agit d'el Outaya à Biskra représenté seulement par trois stations et s'étend sur une superficie qui ne dépasse pas les 1300 Km². Malgré son étendue qui n'est pas aussi large rapport aux autres plaines, la plaine d'Annaba représenté par le même nombre important de stations que la plaine de Hodna avec 16 stations, cela est dû à la présence d'une grande densité de réseau pluviométrique dans la région côtière comme il est connu.

Nous avons en conséquence pu avoir après l'application de cette méthode sept stations fictives représentent chacune la moyenne des précipitations tombées sur une plaine, le tableau 4.2 résume les caractéristiques des stations fictives prises comme données de base.

Tableau 4.2 Les caractéristiques des stations fictives prisent pour chacune des plaines

Plaine	Surface (Km ²)	Élévation (m)		Les statistiques des séries pluviométriques annuelles (mm)			
		Max	Min	Moyenne	Écart type	Max	Min
Annaba	1623.65	400	0	654.6	156.1	1000.1	385.3
Batna	2108.97	1596	666	306.7	94.9	651.9	163.0
Hodna	9501.08	911	383	227.6	73.0	468.1	105.0
Meskiana	1569.93	1409	809	312.4	100.3	579.6	124.8
Outaya	1298.32	541	157	139.1	68.8	365.3	30.6
Sétif	3709.15	1432	652	352.3	82.0	549.7	202.5
Tébessa	2411.19	1354	634	287.4	81.8	495.3	152.5

Nous apercevons tout de même que l'application de la méthode des polygones de Theissen n'a pas beaucoup influencé les moyennes générales, c'est-à-dire à titre explicatif, la plaine d'Annaba située dans une région où il pleut beaucoup plus, sa moyenne est restée proche de la valeur réelle de sa station et demeurée toujours maximale par rapport aux autres stations qui se trouvent dans des régions moins pluvieuses à savoir celle d'Outaya qui est la moins pluvieuse et qui a gardé aussi sa faible moyenne de précipitation, cela probablement peut nous conduire à utiliser avec succès cette méthode.

4.2.2. Évaluation et comparaison de sept indices de sécheresse application sur les sept plaines.

Dans cette partie nous allons employer sept indices de sécheresse qui prennent uniquement les précipitations comme données de base sur les sept stations représentatives, pour une la période s'étale de l'année hydrologique 1960-61 aux 2013-14 soit 54 ans.

Les sept stations ou plutôt les sept plaines sont ; la plaine d'Annaba située dans le bassin des côtières constantinois, Batna se trouve sur les montagnes des Aurès et les chaînes de l'Atlas Saharien, la plaine vaste de Hodna très connue par son grand chott, Meskiana et les plaines de Tébessa, ces plaines connues par leurs productions agricoles particulièrement les blés, situées à l'extrême Est du pays proche des frontières tunisiennes et la plaine de Sétif se trouve sur les hauts plateaux et en dernier la plaine d'el Outaya dans la wilaya de Biskra.

Les sept indices en question sont l'indice connu et déjà utilisé dans la section précédente, qui est l'indice SPI ainsi qu'en parallèle ; l'indice Z-score, l'indice China-Z et l'indice modifié de China-Z (CZI, MCZI), le pourcentage à la normale (PNI), l'indice des déciles (ID) et en dernier l'indice efficace de sécheresse (EDI). L'application de ces indices se fait à plusieurs échelles de temps de 1, 3, 6, 9 et 12 mois, ensuite, une étude comparative sera lancée. D'abord, l'indice SPI-12 appliqué à l'échelle des plaines montre les différences existantes d'une plaine à autre, cependant les résultats concordent tout à fait avec les premières cartes de l'application de SPI-12 sur toute la région. Étant donné qu'on peut constater que les sécheresses des années hydrologiques 1960-61, 1993-94, 2001-02 ont touchées toute la région et par conséquent les sept plaines comme montre la figure ci-après, d'ailleurs on note aussi une similitude de comportement vis-à-vis la sécheresse entre les plaines du Sud celles de Batna, Outaya, et Hodna et moins remarquable entre les plaines qui se trouvent un peu plus au Nord. Les plaines de Tébessa et de Meskiana sont passés par une longue période de sécheresse, il s'agit de la période qui s'étale de l'année 1975 jusqu'aux 1985 et qui coïncide avec les cartes de la variabilité spatiale de la sécheresse dans la région qui n'a pas été épargné durant une longue période comme montre les figures.

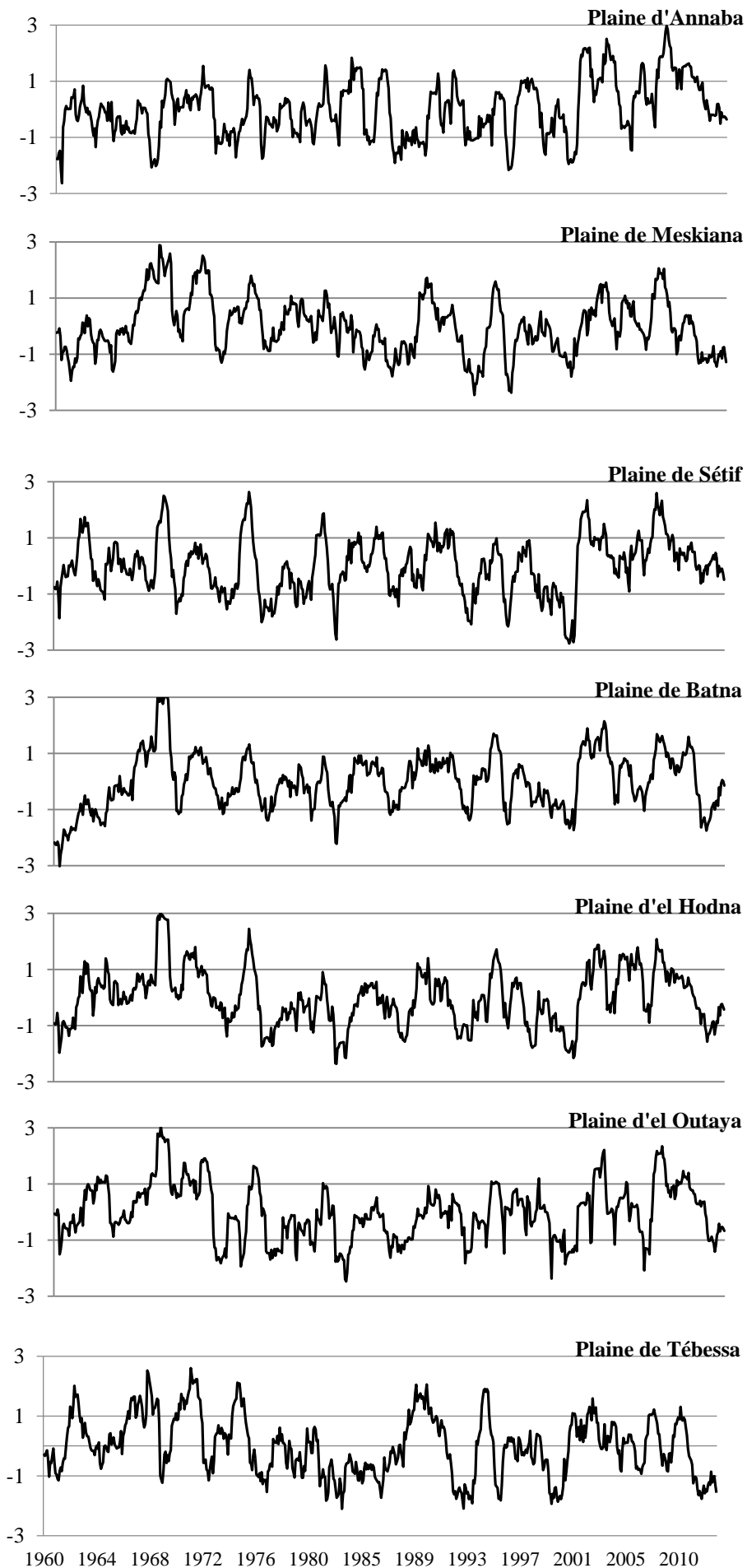


Fig.4.7 La variabilité temporelle de la sécheresse dans les sept plaines utilisant le SPI-12

Tableau.4.3 Les caractéristiques des sécheresses qui ont touchées les sept plaines (SPI-12)

La plaine		Annaba	Batna	Hodna	Meskiana	Outaya	Setif	Tébessa
Durée	Moy	10.19	12.92	10.96	11.76	11.1	9.67	11.30
	Max	38	62	39	39	49	44	76
	Début Fin	1987 1990	1960 1967	1977 1980	1984 1988	1987 1989	1998 2002	1982 1988
Magnitude	Moy	8.13	10.3	8.25	8.80	8.50	7.96	9.07
	Max	42.8	80.9	39.3	38.5	43.5	58.22	69.54
	Début Fin	1987 1990	1960 1967	2000 2002	1992 1995	2000 2002	1998 2002	1982 1988

Le tableau ci-dessus récapitule les caractéristiques des différents évènements de sécheresse qui ont touché les sept plaines depuis l'année 1960 au 2014, ce qui est notable en première attention, c'est la sévérité très élevée qui a affecté la plaine de Batna, avec une magnitude dépassant les 80 entre le début de 1960 jusqu'à la fin de l'année 1966, pour une durée de 62 mois. La plaine de Tébessa n'a pas été à l'abri et elle était affectée par une sécheresse très sévère (69.5) et persistante (76 mois), soit le plus long épisode de sécheresse marquée sur toutes les plaines. Il est clair que les plaines de Batna et de Tébessa situées dans la zone semi-aride sont les plus vulnérables aux sécheresses et qui ont les moyennes les plus élevées des magnitudes enregistrées.

Quant aux plaines de Hodna et Outaya situées dans des zones beaucoup plus arides sont moins fragiles en d'autres termes par rapport aux autres plaines dans un climat moins dur, alors que la plaine d'Annaba la plus pluvieuse a marqué la durée de sécheresse minimale ainsi les moyennes minimales quoi qu'il y ait quand même eu lieu une longue sécheresse persistante au début des 1987 atteignant une magnitude de 42.

Les résultats après l'utilisation des autres indices, employant évidemment la même base de données, sont plus ou moins similaires en ce qui concerne la détection des évènements de sécheresse et d'humidité et particulièrement dans le cas des degrés, extrême ou sévère. Pour encore plus de détails nous avons lancé une analyse comparative entre les différents résultats des indices à différentes échelles de temps (1, 3,6, 9, 12 mois) sur les sept plaines.

En se basant sur le tableau (3.5) des classes des évènements secs de chaque indice nous pouvons regrouper les résultats de chaque échelle de temps, il est noté que la classification utilisée dans le travail de Dogan et al. (2012) a indiqué des résultats plus extrêmes pour le PNI que la classification de Barua et al. (2010).

4. Résultats et discussions

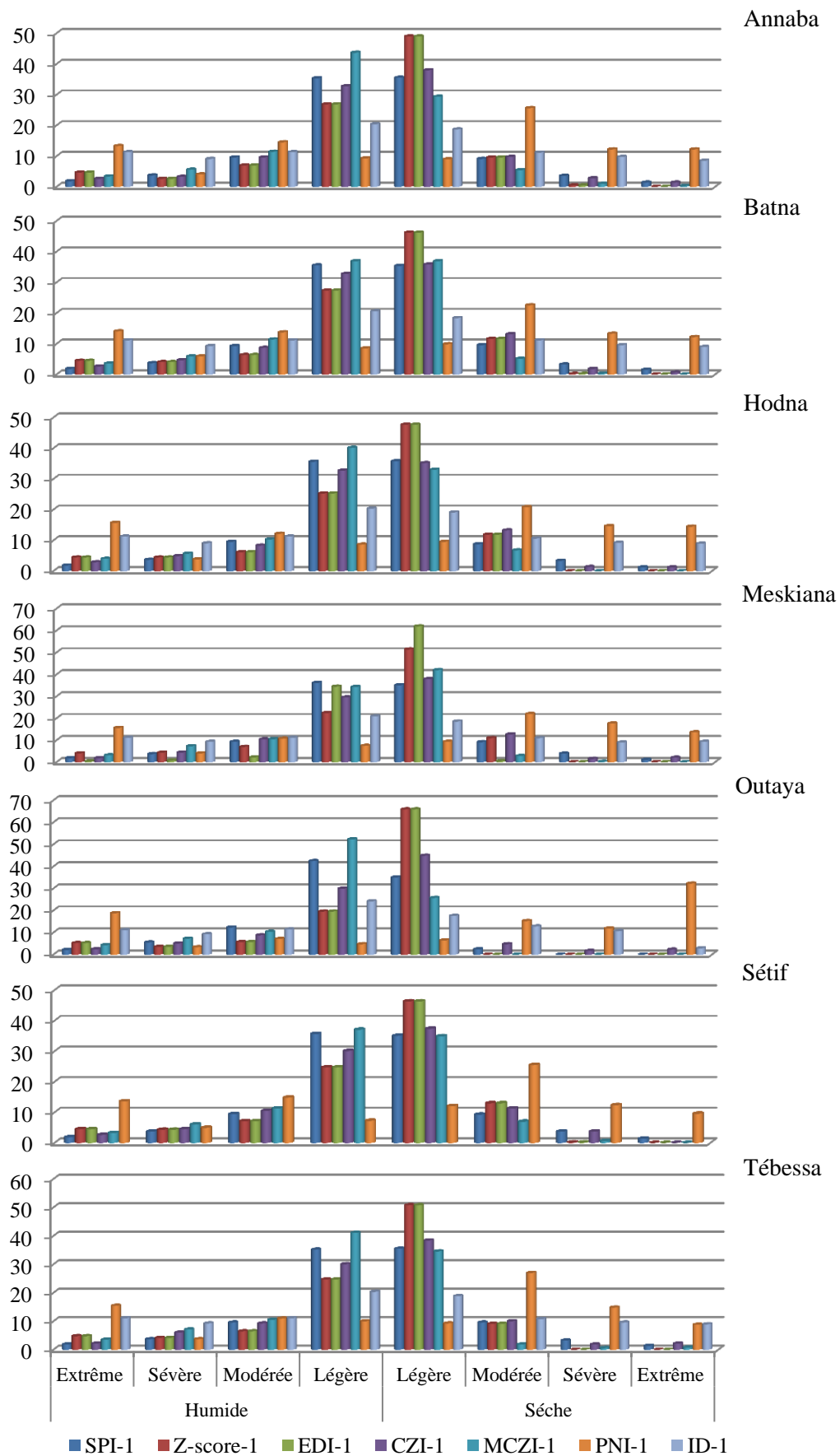


Fig.4.8 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PNI, DI à l'échelle de 1 mois sur les différentes plaines

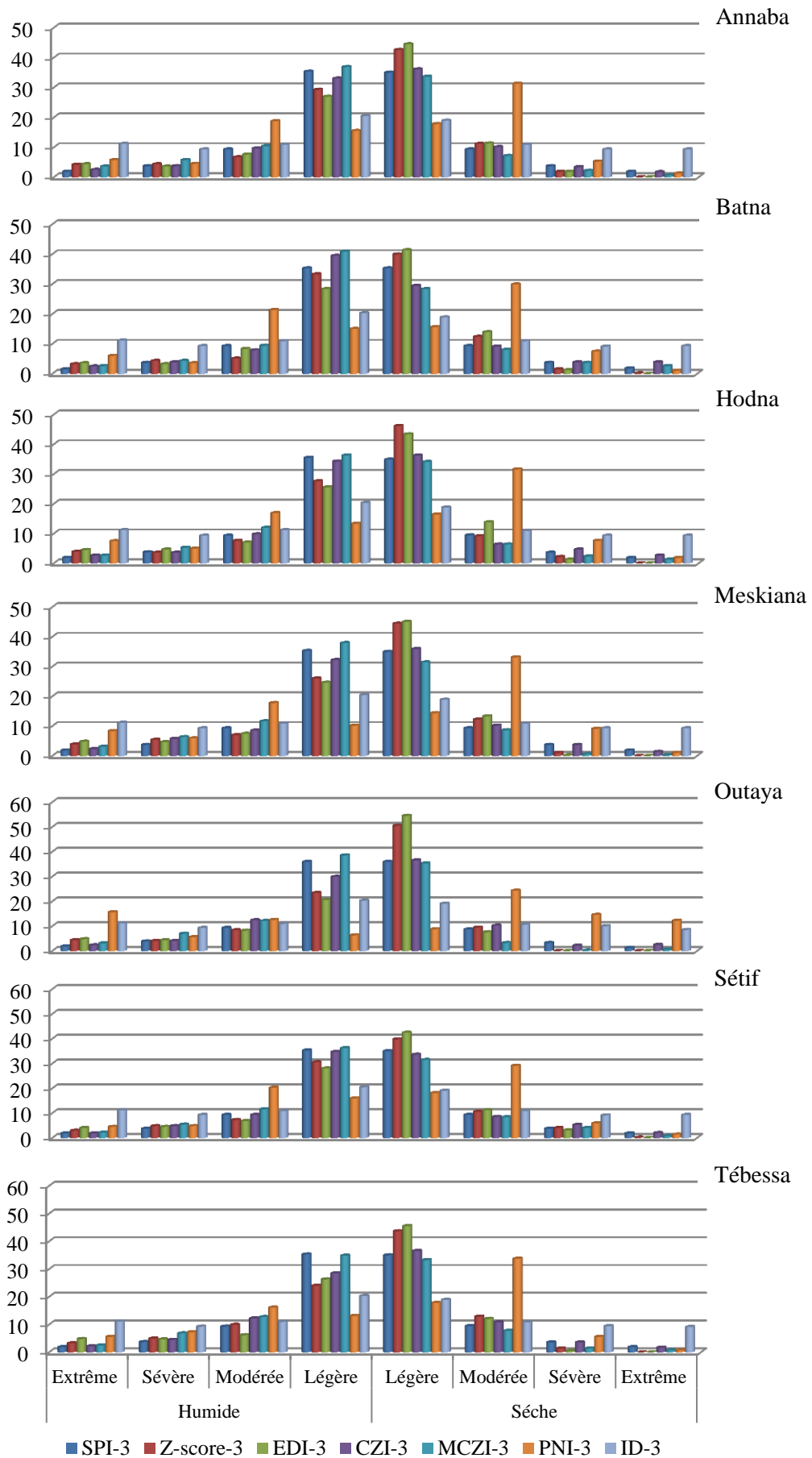


Fig.4.9 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI, CZI, MCZI, PNI, DI à l'échelle de 3 mois sur les différentes plaines

4. Résultats et discussions

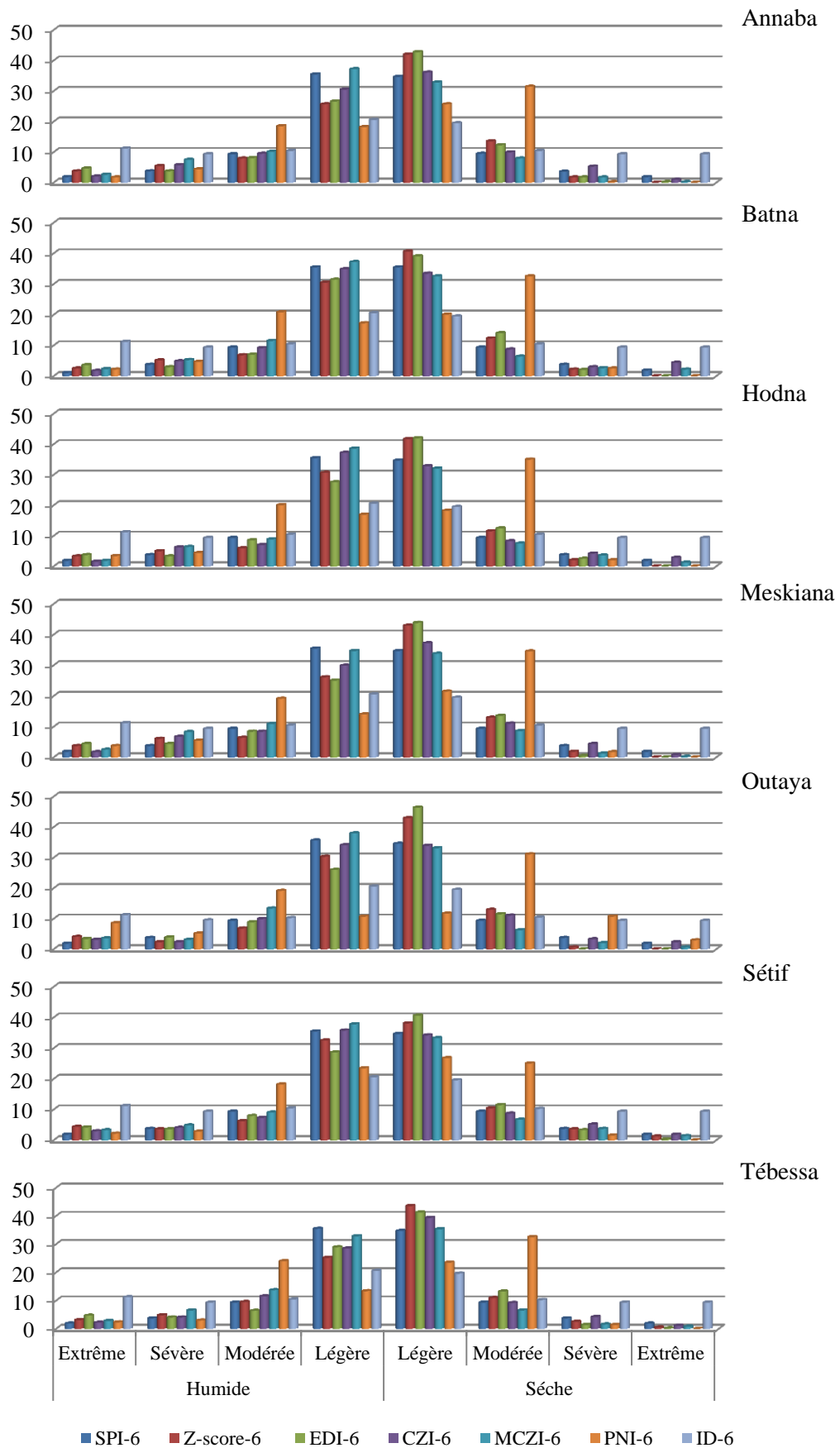


Fig.4.10 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PNI, DI à l'échelle de 6 mois sur les différentes plaines

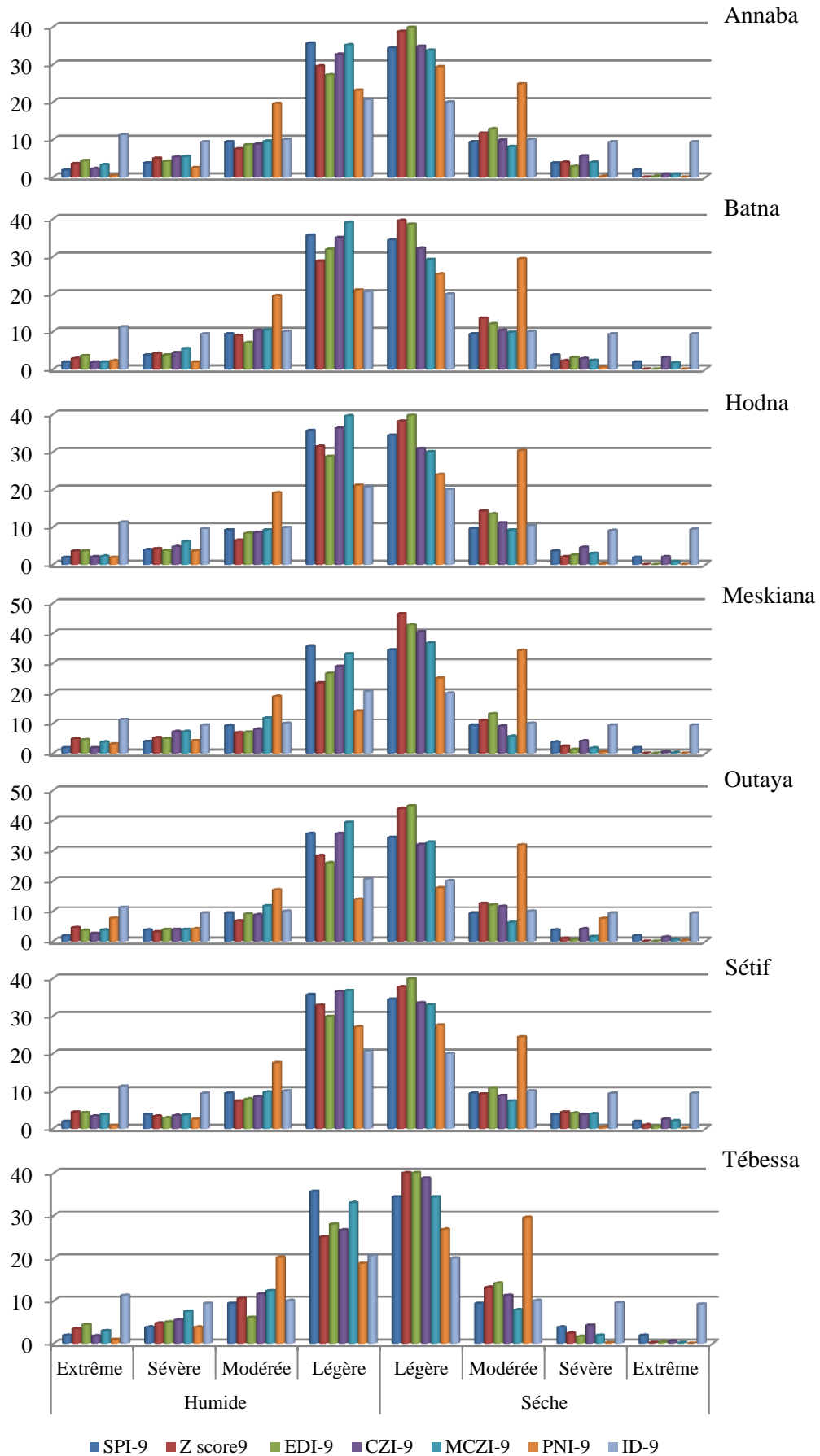


Fig.4.11 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PNI, DI à l'échelle de 9 mois sur les différentes plaines

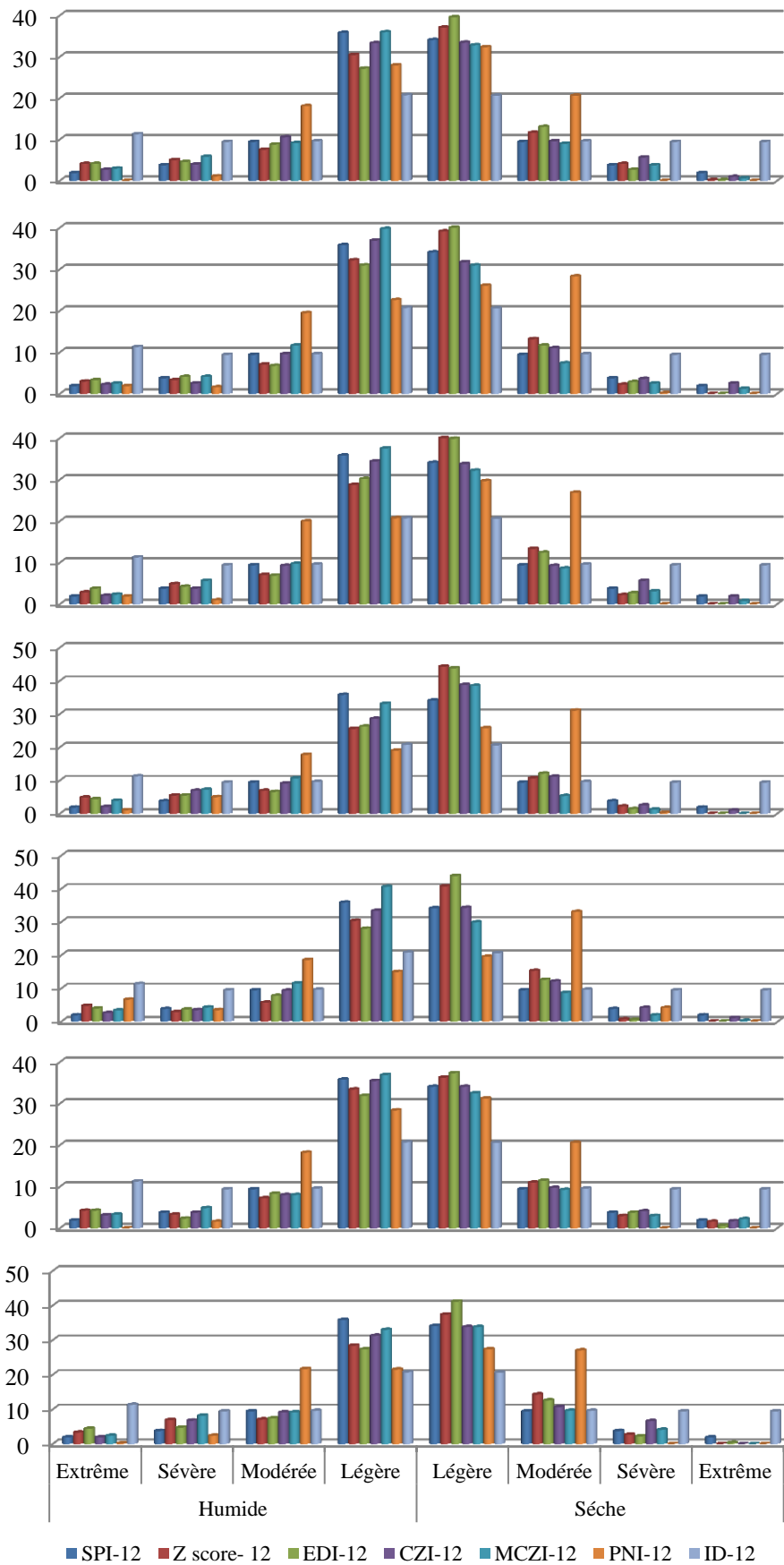


Fig.4.12 Le pourcentage des évènements secs/humides des indices SPI, Z-Score, EDI CZI, MCZI, PNI, DI à l'échelle de 12 mois sur les différentes plaines

Les résultats de la comparaison des occurrences de sécheresses pour les différents indices, montrent que l'indice des déciles ID détecte en permanence une grande fréquence de sécheresse et d'humidité à un niveau extrême à travers toutes les échelles de temps et sur toutes les plaines, tandis que l'indice de pourcentage à la normale détecte avec une grande fréquence une sécheresse extrême à l'échelle de temps de 1 mois qui diminue aux échelles les plus grandes jusqu'aux échelles 9 et 12 où elle disparaît, par contre l'indice continue à détecter l'humidité extrême jusqu'à l'échelle de 9 mois sur la plupart des plaines et à 12 mois sur la plaine d' Outaya.

Ces résultats peuvent être expliqués sur le fait que ces indices surtout celui de pourcentage à la normale était développé à la base pour l'échelle de temps annuelle ce qui explique sa non stabilité pour les échelles de temps les plus petites, ces résultats aussi concorde avec le travail de (Dogan et al. 2012).

L'indice PNI détecte aussi les événements secs et humides d'une manière excessive plus remarquablement pour les événements secs et continue d'augmenter de fréquence en allant vers les plus grandes échelles de temps, quant à la sévérité légère les deux indices détectent cette classe avec le minimum de pourcentage par rapport aux autres indices, en raison que ces deux indices ne sont pas normalisés.

L'instabilité de ces deux indices PNI et ID à travers les échelles de temps ainsi la surestimation des sécheresses extrêmes dans chaque cas nous conduits à tirer la conclusion que les performances de l'utilisation de ces deux indices avec plusieurs échelles de temps sont très limitées.

Quant aux indices SPI, Z-score CZI, MCZI, et l'EDI, il semble y avoir des légères différences entre ces IS à travers les échelles de temps, on note aussi la similitude à détecter les différents événements entre l'indice SPI et MCZI à travers toutes les échelles de temps. Cependant pour mieux détecter les diverses différences et similitudes nous allons faire une analyse de régression entre les cinq indices pour les cinq échelles de temps.

Vu que nous n'avons pas détecté l'effet important de la région sur leurs comportements d'une façon importante dans les figures des occurrences, nous allons tester de voir les différences beaucoup plus par rapport aux échelles de temps.

En faisant l'analyse de régression entre les indices par rapport au SPI, en prenant les cas de la plaine d'Annaba et celle de Batna, la première moins touchée par la sécheresse et située dans une région côtière et une deuxième très fréquemment affectée, située plus au Sud.

Les résultats montrent qu'au niveau des deux zones, il existe une différence marquée par les deux indices CZI et MCZI qui détectent des sécheresses extrêmes atteignant jusqu'à la

magnitude 5 beaucoup plus fréquemment à Batna qu'au Annaba, ces mêmes indices se corrélaient bien avec le SPI et le Z-score pour les cinq échelles de temps considérées, cependant y a toujours des valeurs très négatives par rapport aux SPI et Z-score qui surgissent spécialement quand l'échelle est plus petite, la fréquence de ces valeurs diminuent en allant aux échelles de temps les plus grandes pour les deux plaines, les résultats des autres plaines semblent similaires.

D'après toujours la régression linéaire, les quatre indices ; SPI, Z-score, CZI et MCZI ont généralement une bonne relation sur l'ensemble des échelles de temps et particulièrement aux échelles les plus grandes. Pour les échelles moins de 6 mois malgré la forte similitude entre les quatre indices, mais il se trouve que le CZI et le MCZI expriment des conditions très sèches qui n'apparaissent pas avec SPI et Z-score et cela se reproduit à plusieurs reprises, dont parfois et à titre d'exemple la valeur de SPI n'atteint pas les - 1.5 alors qu'avec les CZI et MCZI enregistrent une valeur inférieure de - 4.5 le cas d'Annaba à l'échelle de temps d'un mois tandis qu'aux échelles de temps de 3 et 6 la valeur continue d'être négative pour l'indice CZI mais pas pour le MCZI qu'il devient beaucoup plus stable et n'affiche pas cette grande magnitude.

Cette remarque n'a pas été reprise sur la plaine de Batna que les fréquences des valeurs très négatives sont beaucoup plus importantes et l'indice MCZI continue à afficher tout comme l'indice CZI ces valeurs jusqu'à l'échelle de 12 mois.

Les résultats concordent tout à fait avec l'étude de (Wu et al. 2001) dont il a montré que le développement de l'indice CZI au MCZI a réduit significativement la différence entre l'indice SPI et CZI, par contre seulement sur la plaine d'Annaba mais pas d'une manière significative sur Batna qui est dans un climat semi-aride, ces valeurs très négatives s'enregistrent particulièrement quand les précipitations sont moins de 30 % par rapport à la moyenne dans la plupart des cas.

Ces différences entre les indices de MCZI, CZI réduit à l'échelle de temps de 12 mois qui deviennent très similaire, par contre les deux indices gardent toujours la sensibilité à détecter plus de magnitude que les autres indices soit SPI et Z-score.

Quant à l'indice Z-score, sa corrélation avec le SPI est très bonne pour les différentes échelles de temps, bien que nous puissions quand même en constater que l'indice Z-score détecte plus d'humidité qu'avec l'indice SPI et en d'autre terme moins sensible que l'indice SPI.

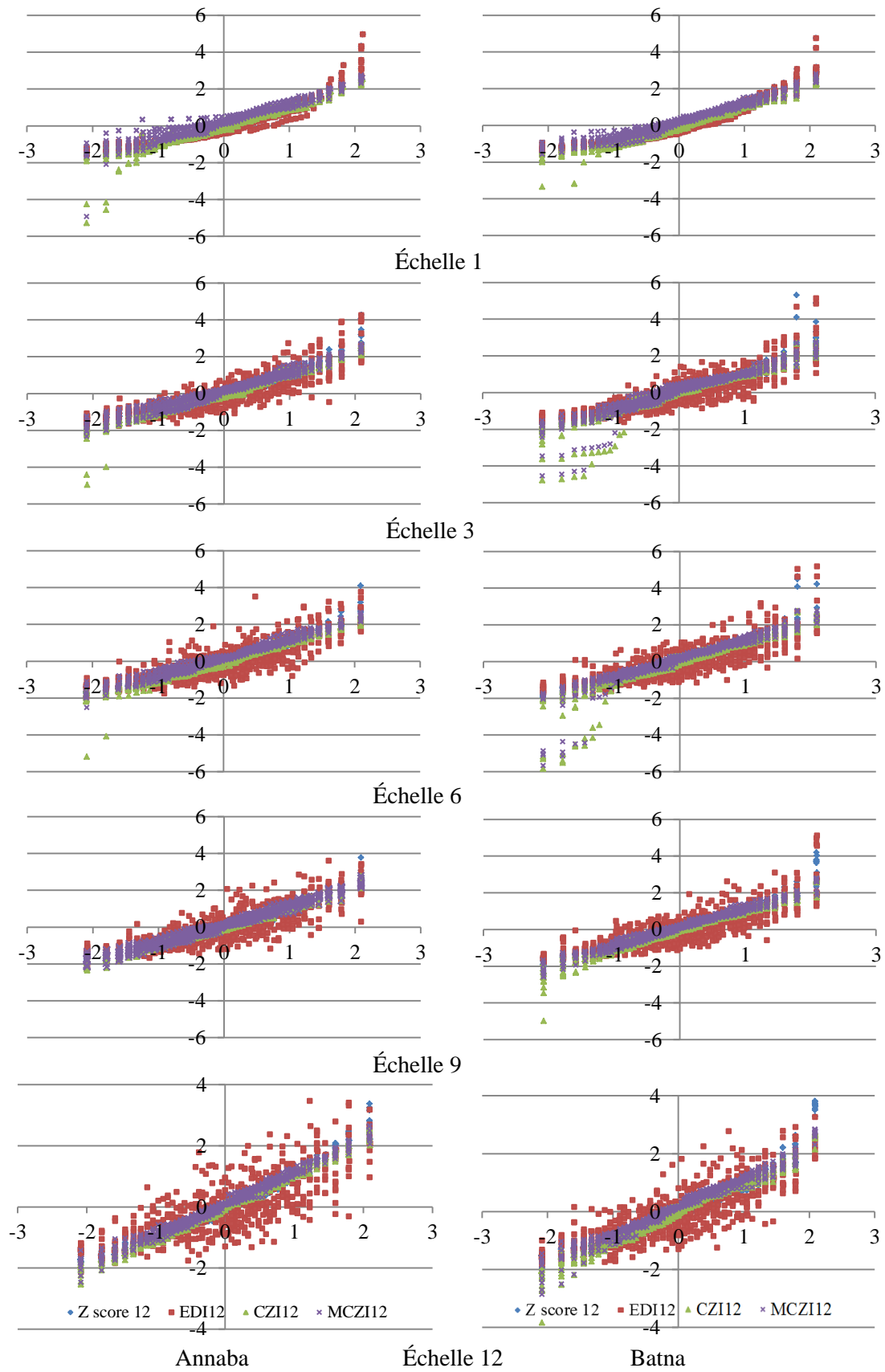


Fig.4.13. Régression linéaire entre les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines d'Annaba et Batna période 1960-2014)

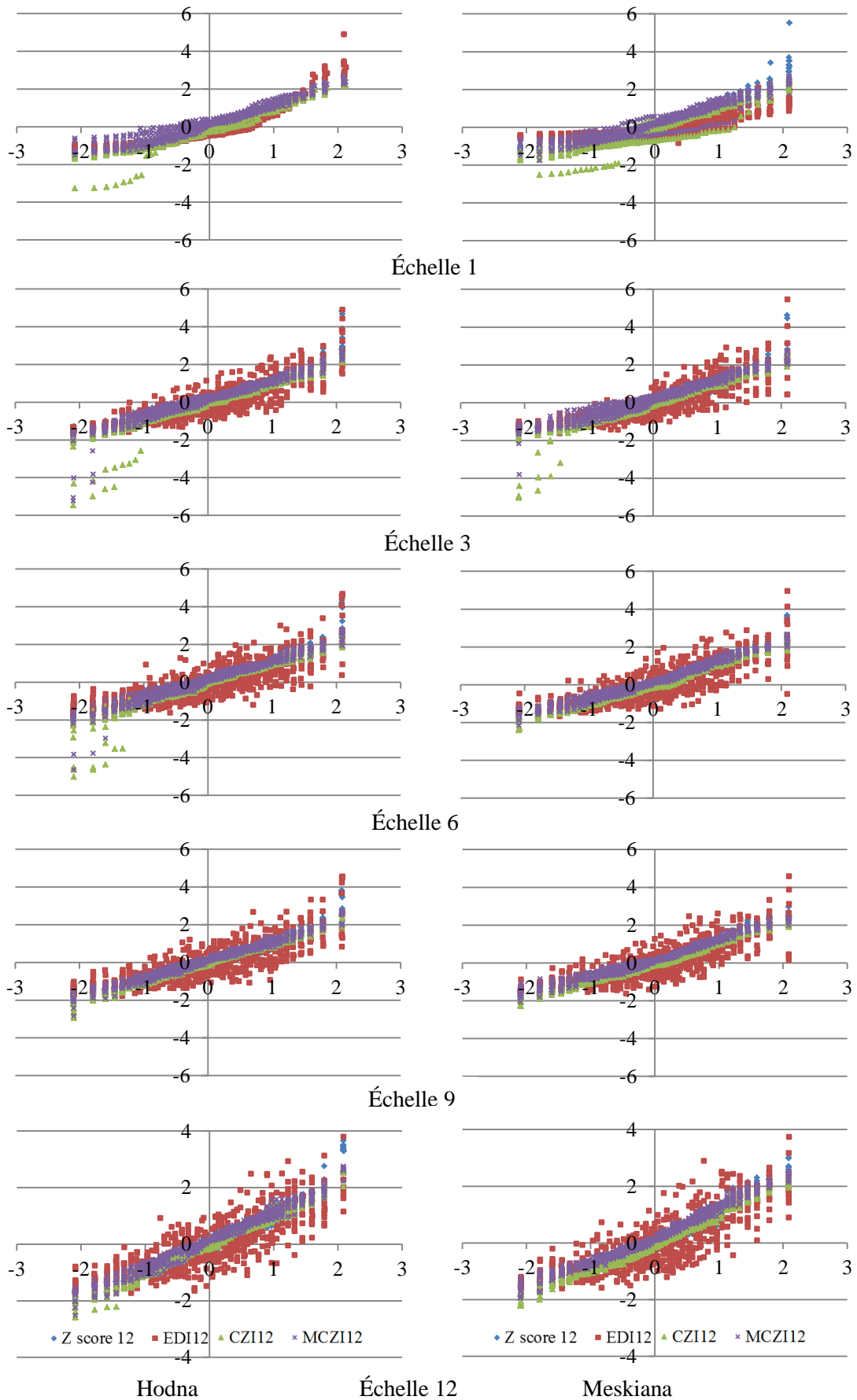


Fig.4.14 Régression linéaire entre les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines de Hodna et Meskiana période 1960-2014)

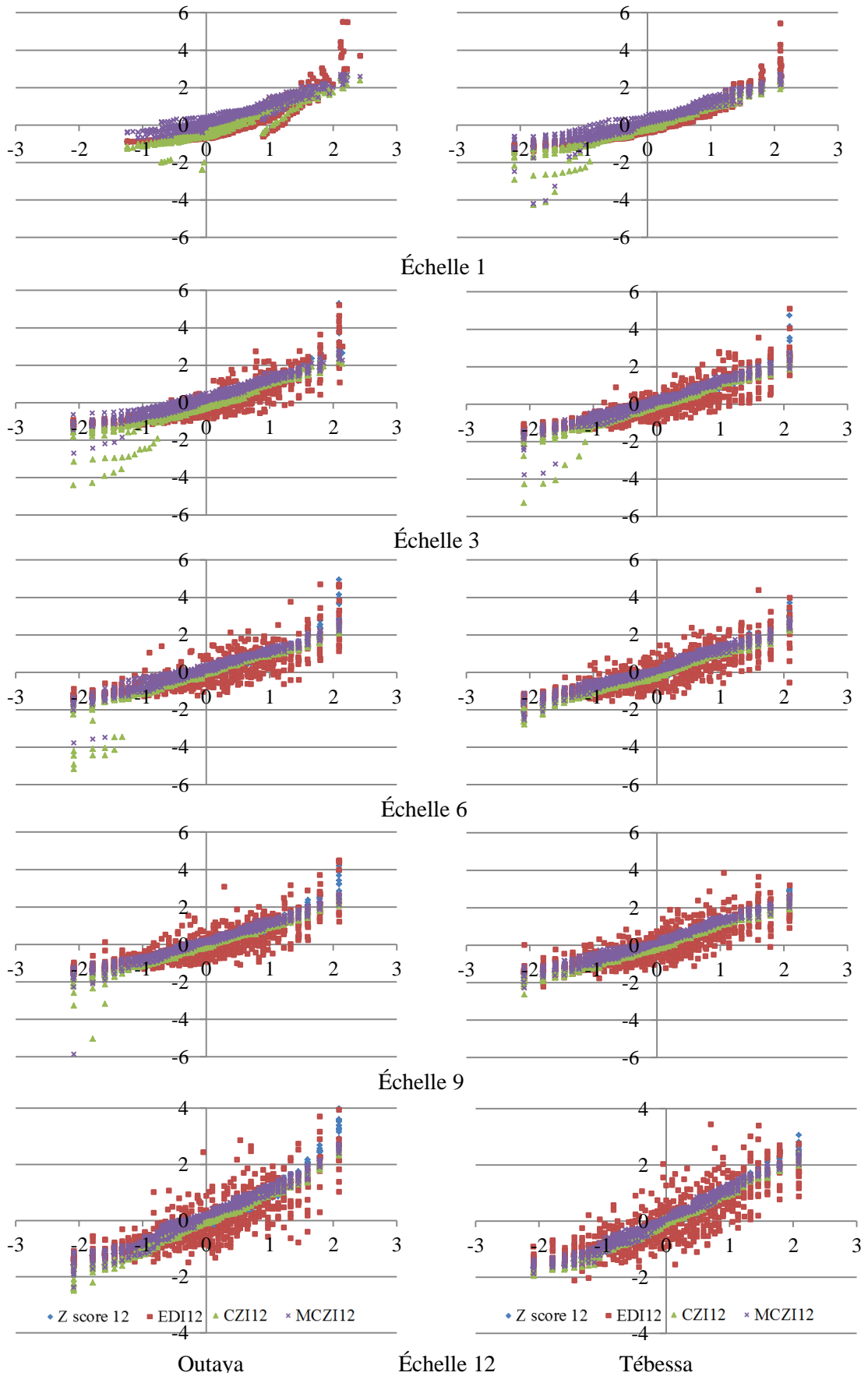


Fig.4.15. Régression linéaire entre les indices ; Z-score, EDI, CZI, MCZI et SPI pour les échelles de temps 1, 3, 6, 9 et de 12 mois (Exemple des plaines d'Outaya et Tébessa période 1960-2014)

En ce qui concerne l'indice EDI, comme montre les figures le montre, on constate une bonne corrélation avec l'indice SPI à l'échelle de temps d'un mois, ensuite la divergence et l'éloignement de la valeur 1 semble s'aggraver en allant vers les échelles de temps les plus grandes dont la corrélation devient la plus faible de tous les indices, cela peut-être lié du fait que cet indice a été créé à la base pour une échelle de temps quotidienne et il est tout à fait plus performant pour la sécheresse de courtes durées c'est-à-dire météorologique.

Les figures montrant les coefficients de corrélation pour chaque indice et chaque échelle de temps avec des résultats qui concordent tout à fait avec ceux précités ou nous pouvons constater l'indice PNI qui commence par une corrélation la moins basse et augmente en allant aux échelles les plus grandes.

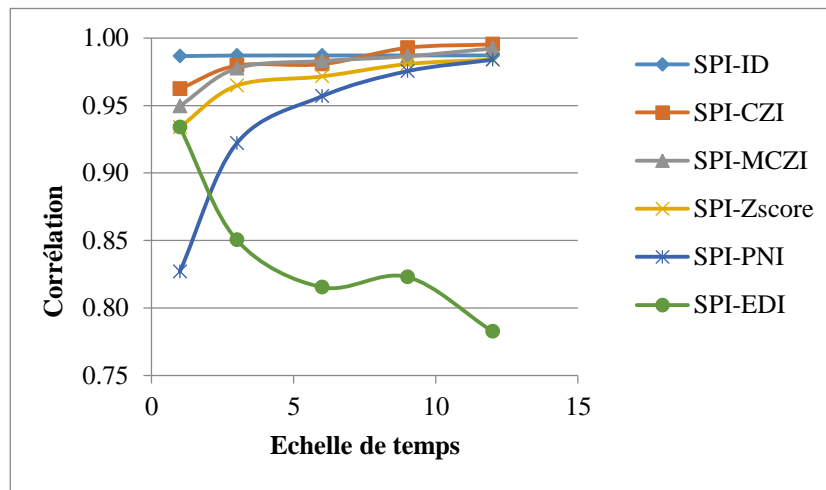


Fig.4.16 Corrélation entre SPI et les différents indices à différentes échelles de temps (Exemple de la plaine d'Annaba)

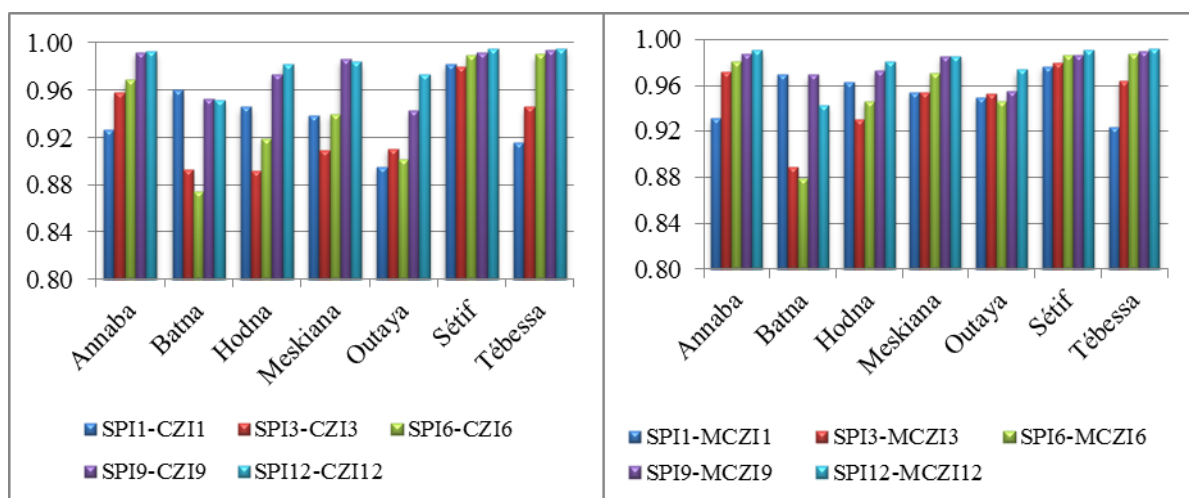


Fig.4.17 Corrélation entre l'indice SPI et CZI, SPI et MCZI à l'échelle de temps 1, 3, 6, 9 et 12 mois pour les sept plaines

La figure 4.17 montre que le coefficient de corrélation change d'une plaine à autre et d'une échelle à l'autre, la corrélation est maximale dans les échelles de temps les plus grandes de 12 ou 9 mois pour les deux indices CZI, MCZI. L'indice CZI semble être moins stable par rapport à celui de MCZI, où on peut noter une corrélation en nette augmentation avec le SPI en allant vers les échelles de temps les plus grandes, sauf dans le cas de Batna connue par des moyennes très basses de précipitations ce qui a affecté les résultats de l'indice qui est très sensible à détecter la sécheresse extrême. On peut constater aussi l'amélioration de l'indice CZI à l'indice MCZI qu'il se rapproche de plus au plus aux résultats des SPI.

En conclusion de cette partie l'indice SPI semble le plus stable en terme de changement de région et d'échelle de temps ainsi qu'il peut être performant pour tous types de sécheresse contrairement aux autres indices, dont nous avons pu constater la limite de leurs utilisations soit pour le cas de l'indice EDI qui est plus rentable dans l'étude de la sécheresse météorologique et de courtes durées et le cas contraire pour l'indice de pourcentage à la normale. Les indices Z-score, MCZI et CZI semblent les plus proches de l'indice SPI bien qu'il y ait des différences de légères à importantes, il est également préférable de les employer avec précaution en tenant compte des résultats de SPI pour ne pas avoir de fausses interprétations.

L'indice SPI reste tout de même le mieux adapté et le plus adéquat aux études de sécheresses à travers le monde, cependant pour une meilleure connaissance approfondie de ce phénomène, il est recommandé d'utiliser d'autres indices qui prennent en compte plus d'un paramètre climatologique afin de voir jusqu'où les performances cet indice SPI peuvent aller en comparant à titre d'exemple à des indices comme le RDI ou le PDSI.

4.3. Prédiction de la sécheresse utilisant le modèle Markovien sur sept plaines du Nord-est Algérien.

La sécheresse est une catastrophe écologique observée très fréquemment dans le monde entier, causant d'énormes pertes dans l'agriculture et des dommages dans les écosystèmes chaque année. Au pays du Maghreb, dont l'Algérie fait partie une augmentation nette de la fréquence des sécheresses a été observée. Ainsi, on est passé d'une sécheresse tous les dix ans au début du 20ème siècle à cinq à six années de sécheresses en dix ans actuellement Le déficit hydrique affecte négativement la production agricole et le rendement des cultures des plaines de la région.

À cet effet et pour faire face à ce problème, cette étude tentera de prévoir les éventuels événements de sécheresse afin de mieux gérer les terres agricoles et contribuer à l'optimisation des ressources en eau pour réduire l'intensité et les effets de cette catastrophe naturelle.

Pour ce faire on a fait appel au modèle Markovien pour l'appliquer sur les variables de l'indice de sécheresse SPI dans le but d'estimer les différentes probabilités d'apparition de sécheresse à travers plusieurs situations Les chaînes de Markov tiennent en compte la liaison entre la succession des valeurs de SPI.

C'est-à-dire, le SPI k dépend que de l'état de SPI $k-1$ pour le processus de Markov d'ordre I et dépend des SPI $k-1$ et SPI $k-2$ dans le cas où le modèle est d'ordre II.

Cette méthode est appliquée à deux échelles de temps, saisonnière où nous nous basons sur les résultats des SPI à l'échelle de 3 mois et annuelle avec SPI-12.

En termes de probabilité quatre situations sont possible dans le cas du premier ordre pour les deux échelles saisonnière et annuelle ;

S-S (deux évènements secs successifs), S-NS (un évènement sec suivi d'un humide c'est-à-dire non sec), NS-S (un évènement non sec suivi d'un autre sec), NS-NS (deux évènements non secs successifs).

En ce qui concerne le processus de Markov d'ordre II, on s'intéresse aux cas où les évènements secs se produisent successivement, par conséquent nous aurons les situations suivantes ;

S-S-S (trois évènements secs successifs), S-S-NS (deux évènements secs successifs avant un autre humide), NS-S-S (deux évènements secs successifs après un évènement humide), et au finale NS-S-NS (un évènement sec isolé).

4.3.1. Processus de Markov d'ordre I

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons pris en compte comme variables, les valeurs de SPI-3 pour étudier les probabilités de chaque état à l'échelle saisonnière, tandis que les valeurs de SPI-12 pour l'échelle annuelle.

a) L'Automne

Tableau.4.4 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Automne) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S	S-NS	NS-S	NS-NS
Annaba	44.8	55.2	58.3	41.7
Hodna	56.7	43.3	56.5	43.5
Batna	50.0	50.0	41.4	58.6
Meskiana	51.7	48.3	58.3	41.7
Outaya	38.5	61.5	59.3	40.7
Sétif	44.0	56.0	46.4	53.6
Tébessa	50.0	50.0	41.4	58.6

Les résultats de processus de Markov d'ordre I pour la saison d'automne sur les sept plaines indiquent que la probabilité ne dépasse pas les 45 % de rencontrer deux automnes secs successifs à Annaba et à Sétif situées dans une zone subhumide tandis que la probabilité la plus élevée d'avoir deux saisons sèches successives est à la plaine de Hodna dans une zone aride avec 56.7 %.

Bien que les résultats montrent qu'en allant vers l'intérieur de la région, plus de probabilité de rencontrer deux automnes secs successifs existe par rapport aux plaines du Nord. On note également qu'il existe une similitude entre les probabilités des quatre situations possibles entre les plaines de Batna et Tébessa, avec une légère différence pour les plaines de Meskiana (41.7 %), Hodna (43.5 %) et Outaya (40.7 %) par rapport à la probabilité d'avoir deux saisons humides successives.

Dans le cas d'un automne non sec, la probabilité pour qu'il soit suivi d'un automne sec est élevée à la plaine d'Annaba malgré qu'elle est située dans une zone humide, cela s'explique par le fait que cette saison est caractérisée par une très grande alternance entre des conditions sèches/humides et donc souvent normales, par conséquent pas de persistance dans ce qui coïncide avec la probabilité importante d'avoir une saison sèche suivie par une saison non sèche, même cas pour la plaine Outaya.

Concernant la probabilité pour avoir deux automnes non successifs elle ne dépasse pas les 50% pour les plaines de climat aride et à Annaba non plus.

b) L'Hiver

Tableau.4.5 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Hiver) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S	S-NS	NS-S	NS-NS
Annaba	41.7	58.3	48.3	51.7
Hodna	57.1	42.9	48.0	52.0
Batna	70.4	29.6	30.8	69.2
Meskiana	61.5	38.5	40.7	59.3
Outaya	62.1	37.9	45.8	54.2
Sétif	44.0	56.0	50.0	50.0
Tébessa	63.0	37.0	42.3	57.7

Les résultats des probabilités pour la saison d'hiver montrent des conditions de sécheresse très rudes sur la plaine de Batna, dont la probabilité d'avoir une succession de deux saisons sèches successives dépasse les 70 % , qui est aussi à la fois supérieur à la probabilité importante d'avoir deux saisons non sèche successives, cela s'explique par le fait que la plaine connue pas une très faible alternance entre les évènements secs/humides c'est-à-dire quoi qu'elle soit la condition de la saison précédente il existe une forte probabilité que la saison d'après soit similaire et beaucoup plus dans le cas de sécheresse.

On note aussi, d'après les résultats qu'il existe plus de probabilité d'avoir une saison sèche suivie d'une autre saison de même condition dans les plaines de l'intérieur de pays par rapport à celle située au Nord à savoir Annaba moins de 42 % et Sétif 44 % , ces deux plaines ont aussi plus de probabilité d'avoir deux saisons non sèche successives par rapport à la probabilité d'avoir une saison sèche suivie d'une saison sèche.

Contrairement aux plaines du Nord celles d'Annaba et Sétif, les plaines de l'intérieur du pays, malgré le pourcentage élevé d'avoir deux saisons non sèches successives, mais il reste inférieur sur toutes les plaines par rapport au pourcentage de probabilité de deux saisons sèches, à titre d'exemple la plaine d'Outaya située au Sud elle a plus de 62 % de probabilité d'avoir deux saisons sèches successives mais ça reste inférieur à la probabilité d'avoir deux saisons non sèches successive qui dépasse le 54 %.

Cela indique que les plaines de l'intérieur du pays ont beaucoup plus de probabilités d'avoir deux saisons sèches successives particulièrement à Batna tandis que la probabilité pour deux saisons non sèche successives et moins important par rapport au premier cas et cela due aux sécheresses plus persistantes dans ses régions.

Nous pouvons aussi noter que la probabilité d'avoir deux saisons non sèches successives aux plaines de l'intérieur de région diminue en allant plus au Sud.

c) Le Printemps

Tableau.4.6 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle saisonnière (Printemps) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S	S-NS	NS-S	NS-NS
Annaba	44.0	56.0	48.3	51.7
Hodna	54.2	45.8	34.5	65.5
Batna	53.6	46.4	48.0	52.0
Meskiana	48.5	51.5	49.3	50.7
Outaya	51.9	48.1	50.0	50.0
Sétif	44.4	55.6	50.0	50.0
Tébessa	50.0	50.0	48.1	51.9

Le tableau ci-dessus indique des résultats similaires avec une légère différence où on constate toujours moins de probabilité pour avoir deux printemps secs successifs aux plaines de Sétif 44.4 % et Annaba 44 % situées dans les zones subhumides par rapport aux plaines de l'intérieur de région dans un climat aride et semi-aride.

Il est clair que dans les trois saisons les plaines du Nord (Sétif et Annaba) gardent la même tendance d'avoir une probabilité de deux saisons sèche successives la moins élevée de toutes les plaines.

On peut noter une différence entre les résultats de printemps et les deux saisons précédents qui concernent beaucoup plus les plaines de Sud. En effet un pourcentage moins élevé de probabilité et ne dépasse pas les 55 % sur toutes les plaines pour avoir deux saisons sèches successives, ce qui peut s'expliquer par le fait que cette saison de printemps est moins affectée par la sécheresse que celles d'automne et d'hiver.

Dans le cas où le printemps et non sec la probabilité pour qu'il soit suivi d'un printemps non sec reste plus élevée par rapport à la probabilité d'avoir deux printemps sec successifs aux plaines du Nord.

En revanche, la plaine de Hodna a noté un résultat contradictoire où elle indique plus de probabilités pour deux printemps non secs successifs (65.5 %) que de probabilités d'avoir successivement deux printemps secs (54.2 %). Ces résultats penchent vers la conclusion que la saison de printemps est moins affectée par la sécheresse et cela se remarque encore plus à la plaine de Hodna. Les résultats d'été qui est une saison déjà sèche ne sont pas en considération.

d) L'échelle Annuelle

Tableau.4.7 L'application de processus de Markov d'ordre I à l'échelle Annuelle pour la période 1960-2014

Plaines	S-S	S-NS	NS-S	NS-NS
Annaba	48.0	52.0	46.4	53.6
Hodna	53.6	46.4	52.0	48.0
Batna	67.9	32.1	36.0	64.0
Meskiana	67.7	32.3	45.5	54.5
Outaya	69.0	31.0	37.5	62.5
Sétif	43.5	56.5	43.3	56.7
Tébessa	48.1	51.9	50.0	50.0

Les résultats du tableau (4.7) complètent ceux susmentionnés dont ils indiquent que la probabilité pour avoir une année considérée comme sèche après une année sèche est plus importante aux plaines de l'intérieur et du sud du pays que celles du Nord. Pour rencontrer deux années sèches successives, la probabilité est largement moins importante aux plaines de Sétif avec 43.5 % et Annaba (48 %) et même à Tébessa (48.1%) tandis qu'en allant plus au Sud, on note une augmentation considérable de probabilité pour avoir deux années sèches successives qui atteignent le maximum à Outaya avec (69 %) et à Batna (67.9 %) rajoutant Meskiana avec plus de 67 %.

Bien qu'il existe une légère différence entre les résultats de l'échelle saisonnière, mais cela n'est pas en contradiction avec ceux de l'échelle annuelle, du fait de la saison d'été dans l'année et cela aussi indique un peu l'effet de la distribution des précipitations au cours de l'année dans chaque région, pour la plaine de Tébessa à titre d'exemple située dans un climat semi-aride, quoique la probabilité soit éminente pour avoir deux hivers secs successifs (63 %) ceci n'a pas affecté l'échelle annuelle avec une probabilité de 48 % pour avoir deux années sèches successives et que cela peut s'expliquer éventuellement par le fait que les précipitations dans la plaine ne sont pas concentrées seulement en hiver ce qui a adoucir le reste de l'année. Dans le même ordre d'idées la plaine de Hodna ayant moins de probabilité de rencontrer deux années sèches successives (53.6 %) que celle indiquée à Outaya (69 %) situées au même climat, ce qui peut être dû à l'effet de Chott el Hodna qui a probablement créé un micro climat moins rude que celui à Outaya.

Par contre, il est noté à Hodna une probabilité plus élevée pour rencontrer deux années sèches successives 53.6 % à celle de deux années non sèches successives (48 %) et cela pour

toutes les plaines situées plus au Sud à savoir Batna, Outaya, Meskiana contrairement aux plaines situées un peu plus au nord ; Sétif, Annaba et Tébessa.

La plaine de Sétif semble plus à l'abri que celle d'Annaba et la plaine la plus souffrante est celle de Batna.

4.3.2. Processus de Markov d'ordre II

a) L'Automne

Tableau.4.8 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Automne) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S-S	S-S-NS	NS-S-S	NS-S-NS
Annaba	38.5	61.5	46.7	53.3
Hodna	45.5	54.5	61.5	38.5
Batna	45.5	54.5	50.0	50.0
Meskiana	57.1	42.9	46.2	53.8
Outaya	66.7	33.3	26.7	73.3
Sétif	27.3	72.7	53.8	46.2
Tébessa	54.5	45.5	41.7	58.3

Les résultats du processus de Markov d'ordre II sont plus ou moins similaires à ceux trouvés avec le processus du premier ordre, concernant la saison d'automne, dont on remarque une très faible probabilité de rencontrer trois automnes secs successifs aux plaines du Nord, d'Annaba avec une probabilité de 38.5 % et à Sétif de 27.3 %.

Cette situation ou plutôt cette probabilité augmente en allant plus vers le Sud. En effet, la probabilité d'avoir un automne sec après deux automnes successifs considérés comme secs est plus importante aux plaines de Hodna et Batna de 45.5 % et plus élevée respectivement à Tébessa (54.5 %) et à Meskiana (57.1 %) et beaucoup plus élevée dont elle atteint son maximum à la plaine Outaya à l'extrême Sud avec 66.7 %.

La probabilité qu'une saison non sèche suivie de deux saisons sèches successives est plus élevée à la plaine de Hodna 61.5 %, tandis qu'elle est moins probable à Outaya avec seulement 26.7 % où il existe une alternance entre les événements humides/secs plus que la persistance de sécheresse ou la continuité des conditions humides ce qui est en accord avec le processus d'ordre I.

On note une probabilité plus élevée d'avoir trois automnes secs successifs à Meskiana et à Tébessa que celle estimée à Batna et Hodna. Ces deux régions caractérisées par un climat semi-aride sont très vulnérables à la sécheresse.

b) L'Hiver

Tableau.4.9 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Hiver) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S-S	S-S-NS	NS-S-S	NS-S-NS
Annaba	60.0	40.0	30.8	69.2
Hodna	56.3	43.8	66.7	33.3
Batna	72.2	27.8	62.5	37.5
Meskiana	50.0	50.0	81.8	18.2
Outaya	55.6	44.4	72.7	27.3
Sétif	63.6	36.4	38.5	61.5
Tébessa	50.0	50.0	81.8	18.2

En ce qui concerne la saison d'hiver les résultats indiquent que si deux automnes secs se suivent, une forte probabilité que le troisième d'après, soit également sec aux plaines de Batna particulièrement avec 72.2 % puis à Sétif 63.6 % et à Annaba avec 60 %, tandis qu'aux plaines de Hodna et Outaya sont plus ou moins similaires avec plus de 55 % de rencontrer trois saisons sèches successives. On note une comptabilité entre les résultats de Meskiana et Tébessa pour les quatre situations.

Les résultats semblent difficiles à interpréter notamment si on se focalise seulement sur le cas de trois saisons sèches successives où il existe étonnamment une probabilité importante voir très élevée aux plaines du Nord ; Sétif et Annaba, par contre si on voit la deuxième partie du tableau il existe pour les deux plaines une forte probabilité pour qu'une saison sèche soit isolée entre deux saisons non sèches avec plus de 69 % à Annaba et 61 % à Sétif. Pour expliquer ce comportement, il s'avère que ces deux plaines ont connues seulement deux épisodes de sécheresse avec une durée de plus de 4 ans à travers la période d'étude c'est-à-dire plus de quatre hivers secs de suites, alors que le reste de la période il y a eu lieu soit des évènements humides soit une alternance entre humide/sec, ce qui a fait que la probabilité d'avoir deux saisons sèches est moins importante dans le cas d'ordre I et donc existe quand il y a eu lieu deux saisons sèches elles seront forcément suivies d'une troisième saison sèche.

Donc ces résultats au final ne contredisent pas ce que nous avons résumé dans le cas du premier ordre seulement cela explique que les évènements de sécheresse qui ont touché les plaines de Nord à l'hiver étaient quand même les plus persistants. Contrairement à Batna qu'on remarque la probabilité d'avoir une saison d'hiver sec isolé reste faible et de ce fait plus de probabilité pour le cas soit de deux saisons ou trois saisons sèches successives.

c) Le Printemps

Tableau.4.10 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle saisonnière (Printemps) pour la période 1960-2014

Plaines	S-S-S	S-S-NS	NS-S-S	NS-S-NS
Annaba	45.5	54.5	38.5	61.5
Hodna	53.8	46.2	50.0	50.0
Batna	60.0	40.0	50.0	50.0
Meskiana	33.3	66.7	37.5	62.5
Outaya	53.8	46.2	53.8	46.2
Sétif	41.7	58.3	53.8	46.2
Tébessa	50.0	50.0	46.2	53.8

Les résultats de l'application du processus Markovien d'ordre II sur la saison de printemps nous a conduits à avoir la même réflexion, celle qui confirme que plus de probabilité de sécheresse persistante touche les plaines du Sud que celles du Nord.

Le tableau montre qu'il existe une faible probabilité de rencontrer trois printemps secs successifs particulièrement à Meskiana avec seulement 33.3 % où il semble y avoir une stabilité au niveau de cette saison par rapport à la sécheresse ainsi qu'aux plaines de Sétif et avec respectivement 41.7 % et 45.5 %

Quant aux plaines du Sud, on note que les résultats à Outaya et Hodna sont très similaires surtout dans la probabilité d'avoir trois printemps secs successifs avec 53.8 % de probabilité qui est supérieure à celle au Nord mais inférieure toujours à la plaine la plus affectée de Batna avec 60 %.

Dans le cas où un printemps est non sec, la probabilité pour qu'il soit suivi de deux printemps secs successifs ne dépasse pas les 39 % à Annaba et à Meskiana, tandis qu'elle est de 46 % à Tébessa. Par contre, les mêmes résultats étaient notés à la plaine de Batna et Hodna avec 50 % de probabilité d'avoir deux saisons sèches successives après une saison considérée comme non sèche et elle dépasse les 53 % à Sétif et Outaya.

d) L'Échelle Annuelle

Le tableau 4.11 récapitule les résultats de processus Markovien d'ordre II à l'échelle annuelle, il indique plus clairement qu'il existe une probabilité très élevée d'avoir trois années sèches successives aux plaines du Sud et de l'intérieur de région plus spécialement celle de Batna avec 72.2 % , Meskiana 70 % , Hodna et Outaya avec 60 % et 63.2 % respectivement, tandis qu'aux plaines du Nord qui sont les moins affectées, la probabilité de rencontrer trois années sèches successives ne dépasse pas les 40 % à Sétif et 45.5 % à Annaba.

Tableau.4.11 L'application de processus de Markov d'ordre II à l'échelle Annuelle pour la période 1960-2014

Plaines	S-S-S	S-S-NS	NS-S-S	NS-S-NS
Annaba	45.5	54.5	53.8	46.2
Hodna	60.0	40.0	50.0	50.0
Batna	72.2	27.8	55.6	44.4
Meskiana	70.0	30.0	60.0	40.0
Outaya	63.2	36.8	77.8	22.2
Sétif	40.0	60.0	41.7	58.3
Tébessa	50.0	50.0	42.9	57.1

Quant à la plaine de Tébessa elle a une probabilité de 50 % pour rencontrer trois années sèches, cependant plus de 57 % pour avoir une année sèche isolée entre deux années humides. Cette même situation est de probabilité très faible à Outaya avec seulement 22.2 % ce qui veut dire y a plus de probabilité pour avoir deux années sèches successives après une année considérée comme non sèche.

Les résultats des deux processus mettent en évidence le degré de vulnérabilité des plaines de l'intérieur et du sud du pays, particulièrement celle de Batna par rapport aux plaines du Nord qui sont moins affectées à savoir celles de Sétif et Annaba.

Ces résultats peuvent être un outil d'aide à la décision et un plan de prévention pour les services concernés surtout pour la gestion en eau, cependant il faut avoir un suivi continu et des séries de données plus longues pour plus de précisions.

Le climat à une influence directe sur la vulnérabilité de chaque région pour cela la suite de cette étude se penche encore plus vers l'effet de climat et le comportement de la sécheresse à travers la diversité climatique.

4.1. Comparaison entre SPI et RDI appliqués à l'échelle locale sous l'influence de climat

4.1.1. Choix des stations

Comme nous l'avons susmentionnée dans le deuxième chapitre et dans le but d'avoir plus de précision dans les résultats dans cette partie, la région d'étude a été découpée en fonction de la distribution du réseau pluviométrique Figure (4.18). En effet, en raison de l'indisponibilité et de manque totale des données de précipitations dans la partie extrême Sud, une grande partie du bassin de Chott Melrir n'a pas été prise en compte, plus exactement la moitié Sud du bassin. Nous savons que la méthode d'interpolation sera encore plus efface quand le réseau est dense et ne contient pas de grandes espaces sans observations, c'est pour cette raison nous avons décidé de retirer la région qui contiennent aucune station.

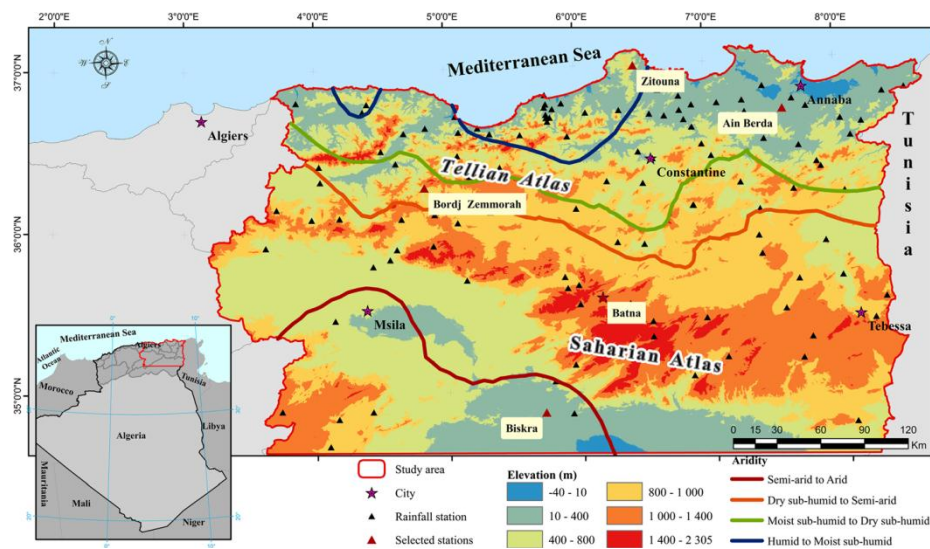


Fig. 4.18 Carte de la zone d'étude découpée montrant l'utilisation des iso-lignes de l'indice d'aridité (Merabti et. al 2017a)

Ensuite, l'indice d'aridité (IA) a été calculé et cartographié afin d'avoir les différentes zones climatiques existant dans la région.

La première zone est caractérisée par un climat humide comporte la région du Collo connue par sa totale de précipitation annuelle le plus élevé du pays atteignant les 1700 mm figure (4.19) de la variabilité spatiale de précipitations, rajoutant la région de Yakourne dans la partie extrême Est située dans le bassin des côtier Algérois. Tandis que la deuxième zone qui englobe la majorité de la région côtière jusqu'au l'Atlas tellien au Sud avec un climat subhumide doux où les précipitations dépassent en général les 800 mm. Au sud de l'Atlas tellien un troisième type de climat surgit, il s'agit du climat subhumide sec qui est beaucoup plus froid et plus sec avec une pluviométrie en moyenne de 650 mm. En allant encore vers l'intérieur des terres on rencontre le climat semi-aride qui se place en couvrant plus que la

moitié de la région d'étude avec un hiver très froid et sec et un été chaud. Encore beaucoup plus au Sud particulièrement dans les plaines de Sud-ouest d'Outaya et de Hodna le climat devient encore plus rude et plus aride où les précipitations ne dépassent pas les 150 mm (Merabti. et al 2017a).

L'indice IA montre un schéma cohérent avec les précipitations, l'aridité augmente du Nord au Sud (Fig. 4.19c), variant de l'humide et subhumide dans le Nord à l'aride dans le Sud-ouest.

En plus des précipitations, l'indice de concentration des précipitations (PCI, De Luis et al. 2000) a également été utilisé pour but de mesurer la variabilité interannuelle des précipitations. La figure (4.19b) montre que l'IPC est moins élevé dans les régions côtières et montagneuses du Nord, bien exposée aux vents humides du Nord-ouest et augmente vers les plaines du Sud, dans les régions où les précipitations sont rares. Les valeurs plus élevées de PCI liées aux régions arides. La diminution des précipitations annuelles et l'augmentation de PCI vers le Sud aident à expliquer le climat aride de la région (Fig. 4.19c)

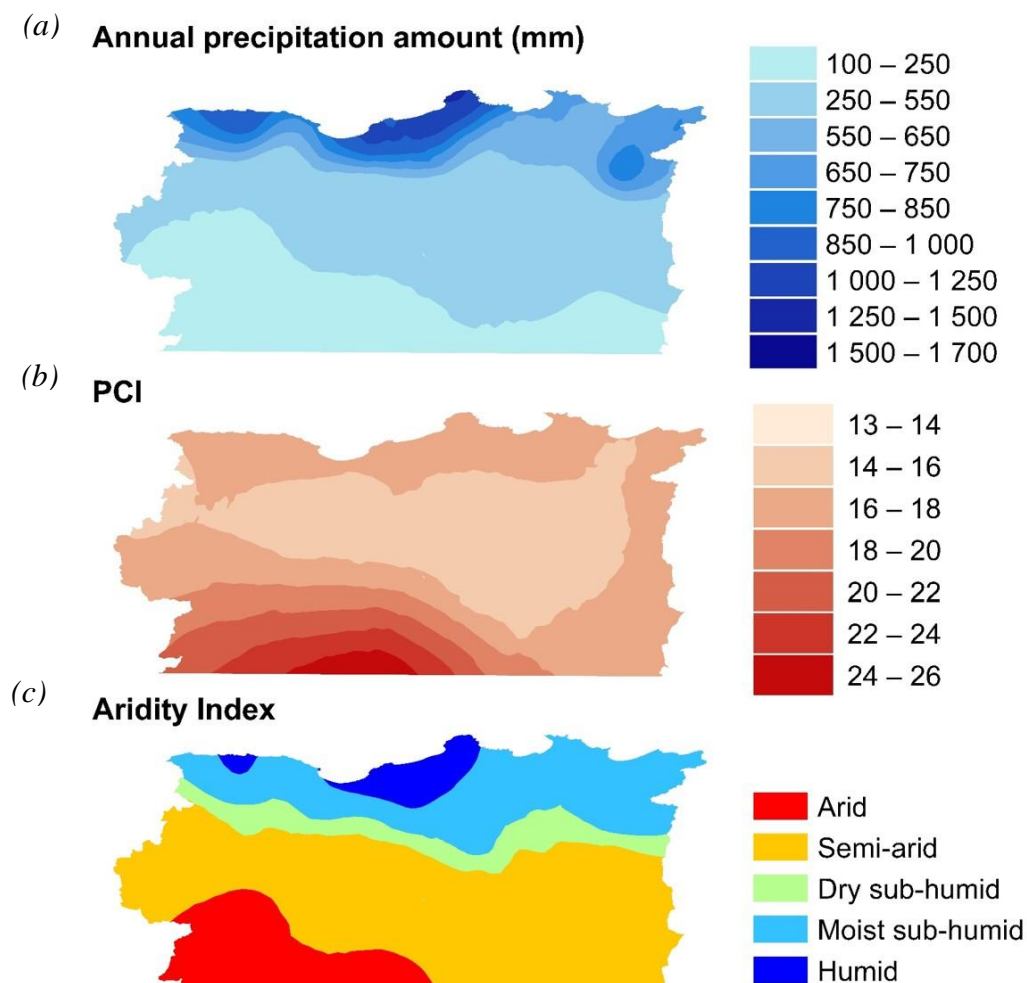


Fig. 4.19. (a) Totale des précipitations annuelles ; (b) Variabilité spatiale de l'indice de concentration de précipitation; (c) Variabilité spatiale de l'indice d'Aridité (Merabti et al. 2017b).

L'objectif de cette partie est de comparer l'indice SPI et RDI à l'échelle de temps de 3, 6 et de 12 mois sur cinq stations chacune représente une zone climatique différente.

L'application de SPI et de RDI est illustrée sur la Figure. (4.20) pour les cinq stations situées dans différentes zones climatiques (Fig. 4.18) :

Zitouna (6 ° 27 '31 "E, 36 ° 59' 28" N, 564 m d'altitude) dans la zone climatique humide

Ain Berda (7 ° 35 '38 "E, 36 ° 41' 28" N, 114 m alt.) Dans la zone subhumide douce.

Bordj Zemmorah (4 ° 50 '02 "E, 36 ° 16' 07" N, 950 m alt.) Dans la zone climatique subhumide sèche centrale et montagneuse.

Batna (6 ° 10 '14 "E, 35 ° 33' 51" N, 1040 m alt.) Dans la zone montagneuse semi-aride.

Biskra (5 ° 43 '04 "E, 34 ° 51' 45" N, 124 m alt.) dans les plaines arides du sud.

La période constituée des années hydrologiques de 1979-80 à 2013-14.

4.1.2. Comparaison entre l'indice SPI et RDI à l'échelle locale

4.1.2.1. La variabilité temporelle des indices SPI et RDI

La variation temporelle de l'indice RDI et celui de SPI calculée pour les échelles de temps de 3, 6 et 12 mois est représentée dans la figure 4.20. La variation temporelle de RDI et de SPI calculée avec les échelles de temps de 3, 6 et 12 mois, montre que le comportement des deux indices est largement similaire, avec seulement une légère différence entre les cinq stations choisies c'est-à-dire pour les cinq climats considérés.

Les conditions de sécheresse et d'humidité identifiées dans une zone climatique ne sont pas souvent les mêmes identifiées dans une autre, ou plutôt ne sont pas de même degré. Ceci est particulièrement évident pour les échelles de temps de 3 et 6 mois. Les différences sont probablement dues à l'influence des deux chaînes montagneuses, de l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien (Fig. 4.18), qui ont un impact majeur sur la circulation atmosphérique au niveau du nord-est de l'Algérie.

De plus, les différences reflètent également l'influence du climat local en raison de l'altitude variée et de l'exposition aux vents qui entraînent les masses d'air humide et les précipitations ainsi que la température et l'ETP. En comparant les résultats pour les stations sélectionnées, on peut constater que le SPI identifie plus de valeurs maximales de sécheresse et d'humidité dans les zones humides et subhumides douces, Zitouna et Ain Berda. Ce comportement est particulièrement plus clair pour les échelles de temps de 6 et 12 mois que celui de 3 mois. On note une différence non similaire au précédente pour le climat subhumide sec présentait par la station de Bordj Zemmorah où le RDI semble identifier des conditions humides plus marquantes et importantes que l'indice SPI. Concernant la station de Batna située dans un climat semi-aride, les différences entre les indices sont assez faibles.

Cependant, pour l'échelle de temps de trois mois, le RDI a identifié les événements les plus extrêmes de sécheresse et d'humidité, pareille pour l'indice SPI qui a identifié les mêmes événements seulement avec des magnitudes plus faibles. Pour les échelles de temps de 6 et 12 mois, les différences entre les indices sont très minces.

Par rapport à la station de Biskra située dans la zone aride, les différences entre les indices sont encore plus flagrantes, surtout pour RDI-6 et RDI-12 qui identifient des valeurs maximales et plus sévères des événements de sécheresse par rapport aux SPI. Les différences entre les indices ne sont que légèrement évidentes pour l'échelle de temps plus courte et pour les climats subhumides secs et semi-arides où l'ETP joue un rôle moins important par rapport aux précipitations. Dans les climats subhumides doux et humides, l'importance des anomalies des précipitations est mieux remarquée par l'indice SPI. Autrement dit, dans la zone aride, RDI détecte des pics de sécheresse plus importante, probablement parce que l'ETP joue un rôle majeur dans les zones où les précipitations sont très faibles.



Fig. 4.20. Variabilité temporelle de l'indice SPI (—) et RDI (—) pour trois échelles de temps (3, 6 et 12 mois) à Zitouna avec un climat humide, Ain Berda Subhumide doux, Bordj Zemmorah, Subhumide sec, Batna semi-aride, et Biskra aride, pour la période de 1979-80 à 2013-14 (Merabti, et al 2017a)

4.1.2.2. L'analyse de régression reliant les indices SPI et RDI à différentes échelles de temps

Afin de mieux identifier les différences entre ces deux indices de sécheresse SPI et RDI à différentes échelles de temps et sous les divers types de climat caractérisant la région, une analyse de régression a été effectuée sur les cinq emplacements précités (Fig. 4.21).

Les graphiques montrent que le coefficient de détermination R^2 est dans tous les cas supérieur à 0,90, ce qui indique que les variances de RDI et de SPI sont assez similaires. Cependant, R^2 augmente quand l'échelle de temps est plus grande, c'est-à-dire du 3 mois au 12 mois, indiquant ainsi que les variances de RDI-12 et de SPI-12 sont beaucoup plus similaires pour les plus grandes échelles de temps. Il est intéressant de noter également que R^2 pour la station de Biskra dans la zone aride est égal à 0,97 pour toutes les échelles de temps, ce qui peut être lié au fait que pour un climat aride, l'ETP, qui est toujours bien au-dessus des précipitations, joue un rôle plus important dans toutes les échelles de temps.

Le coefficient de régression b_0 diminue lorsque l'échelle de temps augmente dans le cas de Zitouna caractérisé par un climat humide et Ain Berda par un climat subhumide doux, contrairement aux autres localités, où le coefficient b_0 augmente lorsque l'échelle de temps augmente (Fig. 4.21). En d'autres termes ce comportement indique que lorsque l'échelle de temps augmente les différences entre RDI et SPI sont plus grandes particulièrement quand le climat est plus humide, avec une tendance pour RDI à sous-estimer les événements les plus humides rajoutant également que l'indice RDI peut avoir une tendance à surestimer légèrement les événements secs.

Au final de cette synthèse, quand l'aridité augmente et pour des échelles de temps plus grandes, la tendance de coefficient b_0 se penche vers l'augmentation, ce qui indique que le RDI tend à surestimer légèrement les événements humides.

4.1.3. Identification des fréquences des événements sèches et humides pour les différents climats

Pour plus de détails sur la comparaison entre ces indices SPI et RDI, les fréquences des événements de sécheresses et d'humidités ont été calculées pour toutes les localités et en utilisant les trois échelles de temps de 3, 6 et 12 mois pour les deux indices.

Les résultats récapitulés au tableau (4.12) indiquent que pour les climats subhumides doux et humides, à l'exception de l'échelle de temps de trois mois l'indice RDI identifie plus d'événements humides que secs. Même cas pour l'indice SPI qui identifie plus d'événements humides que secs en particulier ceux classés comme modérés ou sévères et extrêmes. Les différences entre les indices sont assez minces.

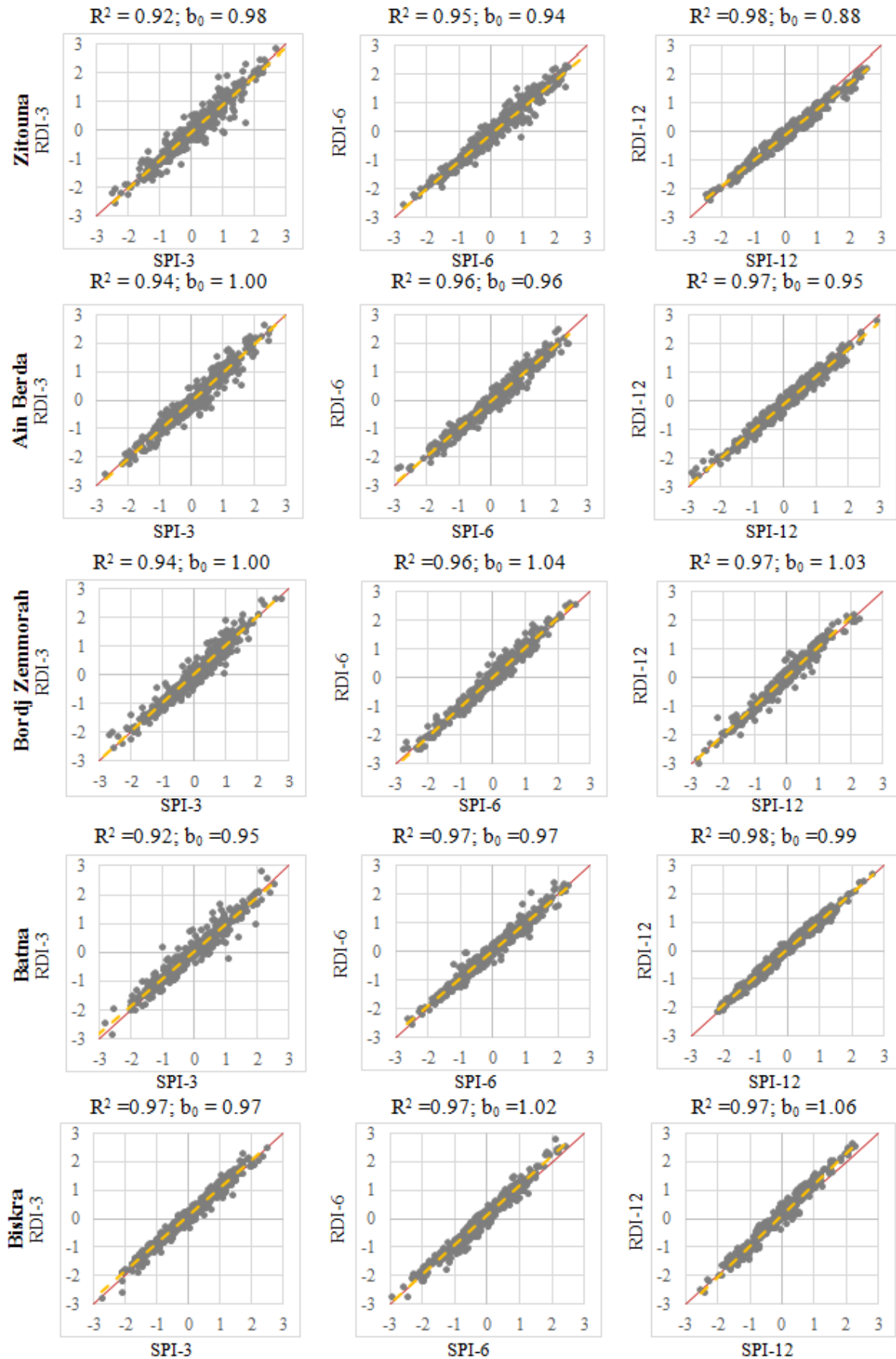


Fig. 4.21. Diagrammes de dispersion entre SPI et RDI pour les 3 échelles de temps (3, 6 et 12 mois) à Zitouna, climat humide, Ain Berda, subhumide doux, Bordj Zemmorah, subhumide sec, Batna, semi-aride, et Biskra, climat aride, de 1979-80 à 2013-14.

Pour le climat subhumide sec, les résultats sont similaires aux climats les plus humides c'est-à-dire les indices SPI et RDI identifient plus d'évènements humides que d'évènements secs. Cependant, il existe un pourcentage plus élevé d'évènements de sécheresse sévère et extrême identifiés avec l'indice SPI par rapport au climat subhumide sec pour toutes les échelles de temps, tandis qu'il y a moins de pourcentages d'évènements humides sévères et extrêmes identifiés avec les indices SPI et RDI par rapport aux deux climats beaucoup plus humides. Concernant la zone semi-aride, le SPI identifie plus d'évènements de sécheresse que d'humidité, tandis que le RDI identifie un pourcentage plus élevé d'évènements humides.

Par rapport à la zone aride, le SPI identifie un nombre beaucoup plus important d'évènements de sécheresse que le RDI, néanmoins les deux indices identifient plus d'évènements de sécheresse que des évènements humides. Les résultats analysés ci-dessus sont légèrement opposés à ceux relatifs aux localisations individuelles, mais permettent essentiellement de percevoir la forte cohérence entre les résultats des deux indices et qu'ils sont bien utilisables simultanément, principalement avec l'avantage de considérer l'ETP dans le cas de l'indice RDI. Néanmoins, le RDI montre des différences plus faibles entre les zones climatiques et les échelles de temps, ce qui est un avantage par rapport à l'SPI cela a également été observé par Banimahd et Khalili (2013).

Les résultats du tableau 4.12 ont montré des résultats similaires entre SPI et RDI pour toutes les échelles de temps, les deux indices étant capables d'identifier presque les mêmes évènements avec une sévérité approchée. Néanmoins, la fréquence des épisodes de sécheresse sévères et extrêmes est plus élevée en utilisant le SPI pour les climats subhumides secs, semi-arides et arides et est plus importante avec le RDI pour les climats humides et subhumides doux.

Ces résultats ne sont pas en contradiction avec les études antérieures (Khalili et al. 2011 ; Shokoohi et Morovati 2015 ; Zarch et al. 2015), même si les sources de données et les échelles temporelles et spatiales de ces études se diffèrent, à titre d'exemple on note l'étude de Zarch et al. (2015) qui ont utilisés de très longues séries de données maillées et des données de modèles climatiques de prédictions à l'échelle mondiale, tandis que Shokoohi et Morovati (2015) ont utilisé la température de ré-analyse et les précipitations maillées observées pour un bassin lacustre Iranien. Plus important encore, les résultats du tableau (4.12) correspondent largement avec ceux trouvés par rapport aux composantes principales rotatives, les deux approches montrent que le RDI, différemment au SPI, répond assez uniformément dans différents climats, probablement en raison de l'inclusion d'ETP, qui intègre les effets du réchauffement climatique dans la RDI.

4. Résultats et discussions

Tableau 4.12 Les évènements secs & humides en (%) dans chaque type de climat utilisant les indices SPI et RDI

Climat	Nombre de station	Indices de sécheresse	Pourcentages des événements secs et humides							
			Évènements secs				Évènements humides			
			Sévère & extrême	Modéré	Légère	Totale des Évènements secs	Sévère & extrême	Modéré	Légère	Totale des Évènements humides
Humide	18	RDI-3	6.8	9.4	33.8	50.1	33.8	9.4	6.8	49.9
		RDI-6	7.8	8.1	33.1	49.0	35.2	9.3	6.6	51.0
		RDI-12	8.1	8.6	31.1	47.9	36.3	10.0	5.8	52.1
		SPI-3	6.7	9.8	32.6	49.1	34.3	9.8	6.9	50.9
		SPI-6	8.0	8.4	31.1	47.5	35.3	9.9	7.4	52.5
		SPI-12	8.2	8.2	29.4	45.8	36.3	10.0	7.9	54.2
Subhumide doux	36	RDI-3	6.3	9.9	34.5	50.6	32.8	9.7	7.0	49.4
		RDI-6	6.9	9.0	34.6	50.5	32.8	9.8	6.9	49.5
		RDI-12	6.9	9.3	33.5	49.6	34.0	9.9	6.5	50.4
		SPI-3	6.2	9.1	33.5	48.8	34.4	9.7	7.0	51.2
		SPI-6	6.7	8.6	33.3	48.7	33.3	10.2	7.9	51.3
		SPI-12	6.7	8.1	32.5	47.3	33.7	10.1	8.9	52.7
Subhumide sec	19	RDI-3	6.5	10.2	33.3	50.0	33.4	9.8	6.7	50.0
		RDI-6	7.2	9.1	33.0	49.2	34.4	9.8	6.5	50.8
		RDI-12	7.5	9.3	31.2	47.9	36.5	9.7	5.9	52.1
		SPI-3	7.0	9.0	33.7	49.6	34.6	9.7	6.2	50.4
		SPI-6	7.3	8.9	33.2	49.4	34.2	10.2	6.2	50.6
		SPI-12	7.7	9.0	31.6	48.3	35.5	9.2	7.1	51.7
Semi-aride	40	RDI-3	6.6	9.2	34.2	50.0	33.4	10.0	6.7	50.0
		RDI-6	7.1	9.4	33.3	49.8	33.3	10.2	6.7	50.2
		RDI-12	7.2	9.8	31.9	48.9	34.9	10.0	6.3	51.1
		SPI-3	8.0	9.4	33.9	51.3	33.8	9.5	5.3	48.7
		SPI-6	8.3	9.6	34.2	52.0	33.3	9.6	5.1	48.0
		SPI-12	8.2	10.2	33.6	52.0	34.6	8.4	4.9	48.0
Aride	10	RDI-3	5.9	9.3	35.9	51.1	32.1	9.4	7.4	48.9
		RDI-6	6.3	9.7	34.1	50.1	33.3	9.5	7.1	49.9
		RDI-12	6.3	11.0	33.3	50.6	33.0	9.1	7.3	49.4
		SPI-3	6.9	10.4	35.7	53.1	31.8	9.5	5.6	46.9
		SPI-6	7.5	9.9	36.0	53.3	32.6	8.4	5.7	46.7
		SPI-12	7.9	11.7	33.5	53.1	33.3	9.0	4.5	46.9

4.2. Variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse basée sur SPI et RDI à différentes échelles de temps

4.2.1. Variabilité spatiale de la sécheresse en utilisant l'Analyse en composantes principales

L'application de l'analyse en composantes principales en mode S sur les deux indices RDI et SPI avec les trois échelles de temps, a mené de retenir deux composantes principales (CP) après (Varimax) rotation, en tenant compte de la contribution de chaque composante principale pour expliquer la variabilité de la sécheresse sur tous les indices. Toute en sachant que le SPI a été calculé pour une période s'étale de 1960-61 aux 2013-14 soit : 54 ans, tandis que le RDI sur la période qui s'étale de 1979-80 au 2013-14.

Tableau 4.13 Le pourcentage des variances expliquées des composantes principales retenues après rotation (Merabti et al. 2017b)

	Variances expliquées (%)		
	CP-1	CP-2	Cumule
SPI-3	40.8	29.3	70.1
SPI-6	42.9	27.8	70.7
SPI-12	44.3	28.5	72.8
RDI-3	43.2	31.7	74.9
RDI-6	45.4	28.9	74.3
RDI-12	45.5	30.1	75.6

Le tableau 4.13 résume la variance expliquée pour chaque composante avec rotation Varimax. La variance cumulée des deux composantes retenues explique plus de 70.1 % de la variance totale en ce qui concerne le SPI et plus 75.6 % pour le RDI pour tous les cas.

Les variances expliquées par rapport au RDI sont plus élevées comparant à l'indice SPI. En tenant compte de la différence entre les périodes de calcul pour chaque indice qui peut avoir une influence sur les différences observées entre les valeurs des composantes principales de chaque indice pour toutes les échelles de temps considérées.

On note qu'au début une troisième composante a été rejeté puisqu'elle n'affichait aucune signification par rapport à la distribution spatiale et aussi au niveau de la variance expliquait qui ne dépasse pas les 10 % pour tous les cas.

La distribution de la variabilité spatiale après avoir employé l'ACP avec rotation sur les valeurs des indices SPI et RDI pour toutes les échelles de temps est illustrée dans la Fig. (4.22), elle montre les deux sous-régions identifiées. Les résultats de la première composante principale pour les deux indices particulièrement pour les échelles de temps de 3 et 6 mois

sont très similaires, tandis que les différences surgies par rapport aux zones identifiées avec l'échelle de 12 mois.

En d'autres termes la similitude est beaucoup plus notée dans l'échelle de temps plus petite et elle commence à diminuer et sera plus ou moins remarquable, mais pas au point d'être contradictoire à l'échelle de temps plus grande.

La première composante pour les deux indices SPI et RDI pour toutes les échelles de temps, explique plus de 40 % de la variance totale comme illustré dans le tableau 4.13, elle représente la région située au Nord dont elle est expliquée avec 45,5 % de la variance totale avec l'indice RDI à l'échelle de 12 mois. Cette première région expliquée par la première composante correspond plutôt aux zones humides et subhumides.

La deuxième composante, toujours après rotation et pour tous les cas, expliqué plus de 27,8 % de la variance totale et elle représentait une deuxième région concentrée au Sud, avec un climat semi-aride et aride (Fig. 4.19c). Cette délimitation des deux régions correspond à très bien à une étude précédente de régionalisation réalisée par Taibi et al. (2013).

La première zone Nord expliquée par la première composante avec l'indice RDI est plus étendue que celle identifiée avec l'indice SPI pour les échelles de temps de 6 et de 12 mois.

En ce qui concerne le RDI, cette zone s'élargit lorsque l'échelle de temps augmente, tandis qu'avec l'indice SPI ne change pas tout à fait par rapport aux différentes échelles de temps. Cette différence doit être explorée davantage, en utilisant d'autres indices de sécheresse.

La zone représentée et expliquée par la deuxième composante comprend la partie Sud de la zone d'étude, plus exactement aux plaines agricoles celles de Hodna et Outaya où les précipitations annuelles, en fonction de l'altitude, sont faibles et fortement concentrées. Ces résultats concordent avec les régions de sécheresse délimitées par Taibi et Souag (2011).

En comparant les résultats des indices pour la deuxième composantes il semble y avoir beaucoup plus de stabilité par rapport à la première composante (Fig. 4.22), néanmoins il existe un léger changement de l'étendue spatiale de la zone entre les différentes échelles de temps pour les deux indices RDI et SPI.

L'analyse spatiale avec l'ACP ne peut pas décrire complètement la variabilité de la sécheresse dans la région d'étude d'une manière exacte, puisque les événements secs/humides peuvent se produire dans un endroit et pas dans d'autres comme nous avons pu le constater dans la première partie de ce chapitre rajoutant à cela, la différence des degrés de sévérité des évènements que ce soit secs ou humides qui ne coïncident pas très souvent par rapport aux autres zones.

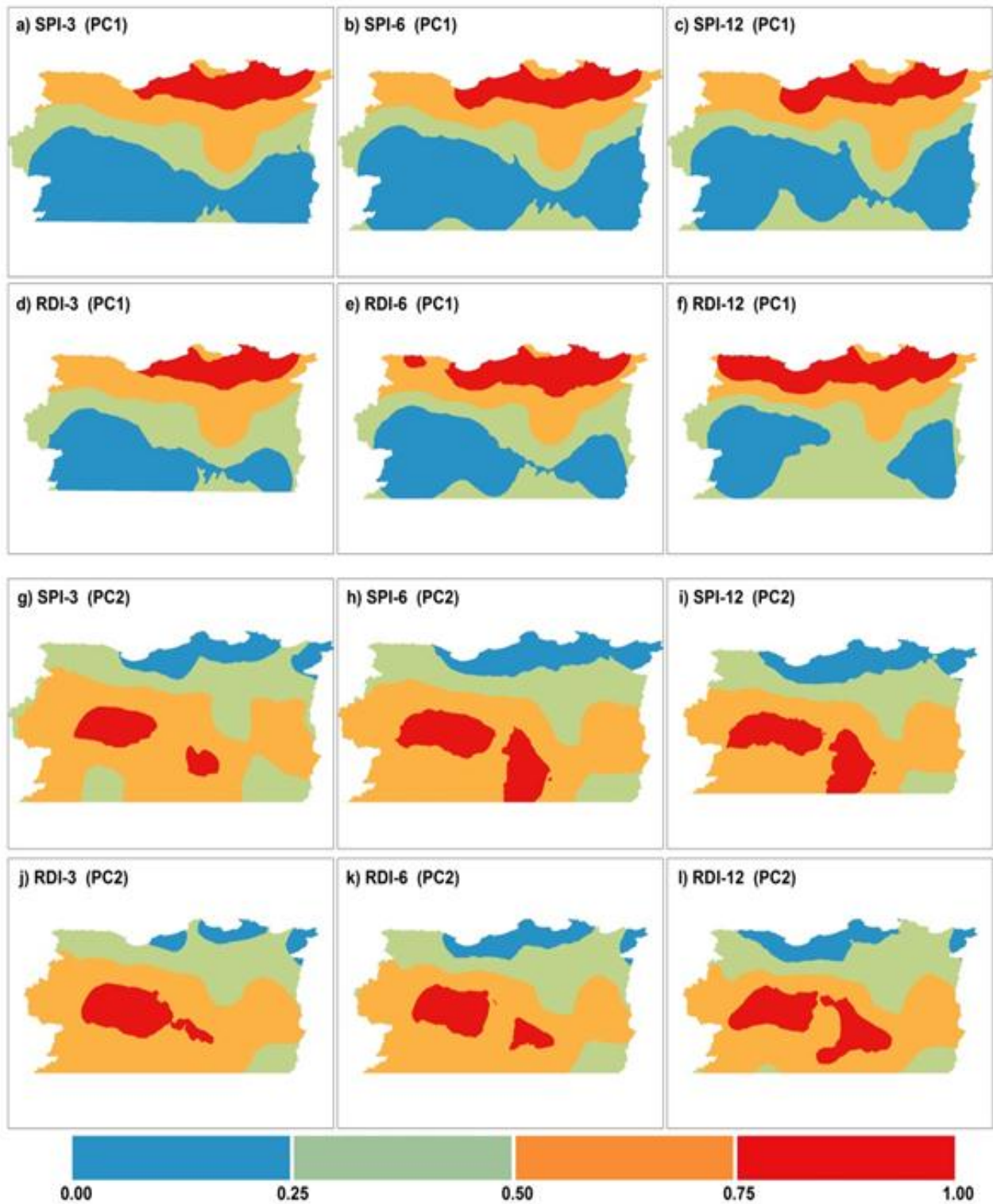


Fig. 4.22. La distribution des deux composantes principales retenues après rotation par rapport au SPI-3 (a et g); SPI-6 (b et h); SPI-12 (c et i); RDI-3 (d et j); RDI-6 (e et k); RDI-12 (f et l) (Merabti et. al 2017b).

4.2.2. Étude de tendance de la sécheresse en employant le test de MMK

Le test de Mann-Kendall modifié (MMK) a été appliqué aux résultats des composantes principales (scores) des indices RDI et SPI pour les trois échelles de temps ainsi pour chaque état, 13 séries chronologiques ont été extraites, une par rapport aux valeurs annuelles de l'indice RDI et SPI et 12 séries temporelles chacune pour un mois de chaque indice, les résultats sont récapitulés au tableau (4.14) et (4.15) ainsi dans la figure (4.23).

Bien qu'auparavant dans la littérature nous ayons rapportée qu'il existe une diminution des précipitations dans les pays du Maghreb, avec une augmentation de la sévérité et des fréquences des sécheresses. Néanmoins, le cas de la présente étude n'indique pas une aggravation des événements de sécheresse dans le nord-est Algérien après avoir utilisé la série de données de la période 1979-80 à 2013-14.

Les résultats de tests de Mann-Kendall modifié et celui de la pente selon la méthode de Sen dans le tableau (4.14), montrent généralement des tendances positives, mais pas vraiment significatives pour les deux indices RDI et SPI à travers les trois échelles de temps.

On peut noter une exception à propos de la tendance positive enregistrée pour les indices SPI et RDI à l'échelle de temps de 6 mois au mois de septembre dans la première zone du Nord présenté par la première composante principale, rajoutant la tendance marquante celle avec le SPI-3 et SPI-12 dans la même région par rapport aux séries temporelles annuelles. Les résultats des deux composantes principales pour les deux indices SPI et RDI avec les trois échelles de temps sont généralement concordants.

Lorsque l'indice SPI a été calculé avec une période plus longue, celle de 1960-61 jusqu'au 2013-14 (Tableau 4.15), les résultats pour la première composante montrent des tendances significatives positives, il s'agit particulièrement pour l'indice SPI-3 dans les séries des mois de janvier, décembre et à l'échelle de l'année, pour le SPI-6 une tendance positive significative dans les séries des mois de janvier à avril ainsi que dans les séries de 12 mois et celle de l'année en utilisant l'indice SPI-12.

Cependant, aucune tendance significative n'a été détectée pour la deuxième composante principale ce qui nous indique que la région du Sud identifiée par la deuxième composante qui est la plus aride est aussi la plus stable par rapport à la région Nord identifiée par la première composante principale qui est la plus humides.

Les résultats pour les séries temporelles les plus longues (54 ans) celles qui concernent l'indice SPI (Tableau 4.15), identifient plus de tendances significatives pour la diminution de la sévérité de la sécheresse que les périodes moins longues qui considèrent seulement les 34

dernières années comme dans le Tableau (4.14). Cette différence est inévitablement liée à la longueur de la série chronologique.

En plus, de l'effet de la taille de séries chronologiques sur les résultats, il est possible d'interpréter ces différences par un léger déplacement du climat vers moins de sécheresses tels que rapporté par d'autres auteurs, par exemple Touchan et al (2011), Trambly et al. (2013) et Zeroual et al. (2017). Ce léger écart peut être lié à une influence réduite, mais non significative de NAO et MO sur l'est de l'Algérie.

Tableau 4.14. L'analyse des tendances des scores de CP rotatifs relatives au RDI et SPI calculés sur des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois en utilisant le test de Mann-Kendal modifié et la magnitude des tendances en utilisant la pente de Sen pour la période 1979 -80 à 2013-14 (Merabti et al. 2017b)

	RDI-3		RCP-2		RDI-6		RCP-2		RDI-12		RCP-2	
	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)
	Jan	0.755	0.005	0.798	-0.008	0.767	0.007	0.635	0.009	0.374	0.018	0.286
Fév	0.865	0.003	0.609	0.007	0.244	0.014	0.609	0.009	0.423	0.016	0.260	0.023
Mar	0.222	0.018	0.712	0.007	0.532	0.017	1.000	-0.002	0.286	0.023	0.260	0.021
Avr	0.460	0.016	0.570	0.011	0.363	0.016	0.910	0.003	0.514	0.013	0.477	0.019
Mai	0.650	0.009	0.712	0.011	0.820	0.005	0.755	0.007	0.358	0.020	0.343	0.017
Juin	0.532	0.016	0.629	0.010	0.256	0.023	0.776	0.005	0.313	0.022	0.328	0.019
Juil	0.293	0.016	0.842	-0.001	0.156	0.023	0.712	0.005	0.236	0.021	0.441	0.011
Aout	0.088	0.018	0.379	0.014	0.268	0.019	0.495	0.011	0.173	0.024	0.712	0.010
Sep	0.058	0.034	0.328	0.014	0.012	0.033	0.299	0.018	0.248	0.027	0.495	0.016
Oct	0.459	0.018	0.202	0.019	0.260	0.025	0.423	0.021	0.248	0.021	0.236	0.022
Nov	0.379	0.020	0.776	0.004	0.343	0.024	0.534	0.013	0.182	0.026	0.406	0.017
Dec	1.000	0.000	0.733	-0.010	0.635	0.010	0.744	0.007	0.313	0.022	0.441	0.012
Annuelle	0.153	0.011	0.388	0.006	0.721	0.003	0.539	0.010	0.164	0.016	0.349	0.014

	SPI-3		RCP-2		SPI-6		RCP-2		SPI-12		RCP-2	
	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)
	Jan	0.410	0.018	0.691	0.005	0.722	0.006	0.495	0.010	0.343	0.020	0.109
Fév	0.798	0.005	0.776	-0.006	0.256	0.019	0.551	0.011	0.320	0.017	0.140	0.027
Mar	0.842	0.004	0.887	-0.002	0.349	0.023	1.000	0.000	0.233	0.021	0.132	0.025
Avr	0.842	0.004	0.820	0.003	0.320	0.018	0.755	0.005	0.201	0.023	0.222	0.018
Mai	0.320	0.020	0.887	0.006	0.776	0.007	0.570	0.011	0.182	0.025	0.256	0.018
Juin	0.293	0.018	0.589	0.014	0.307	0.023	0.670	0.009	0.201	0.028	0.222	0.023
Juil	0.495	0.010	0.570	0.019	0.244	0.021	0.691	0.010	0.182	0.028	0.280	0.020
Aout	0.334	0.019	0.410	0.018	0.268	0.014	0.280	0.021	0.182	0.025	0.293	0.019
Sep	0.343	0.016	0.836	0.005	0.008	0.030	0.163	0.027	0.182	0.032	0.390	0.021
Oct	0.054	0.026	0.202	0.022	0.155	0.024	0.202	0.023	0.173	0.025	0.173	0.029
Nov	0.078	0.021	0.222	0.018	0.313	0.023	0.313	0.017	0.138	0.030	0.213	0.028
Dec	0.320	0.017	0.280	0.014	0.594	0.010	0.514	0.012	0.182	0.031	0.286	0.021
Annuelle	0.044	0.009	0.327	-0.004	0.179	0.009	0.009	0.013	0.007	0.018	0.194	0.010

Tableau 4.15. L'analyse des tendances des scores de CP rotatives relatives au SPI calculés sur des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois en utilisant le test de Mann-Kendal modifié et la magnitude des tendances en utilisant la pente de Sen pour la période 1960-61 à 2013-14 (Merabti et al. 2017b)

	SPI-3		RCP-2		SPI -6		RCP-2		SPI -12		RCP-2	
	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)	MMK	Pente (Sen)
	Jan	0.028	0.021	0.110	-0.018	0.034	0.017	0.753	-0.003	0.044	0.019	0.684
Fév	0.371	0.009	0.071	-0.017	0.042	0.019	0.412	-0.009	0.024	0.019	0.403	-0.008
Mar	0.144	0.015	0.144	-0.013	0.021	0.022	0.081	-0.014	0.020	0.018	0.514	-0.009
Avr	0.244	0.012	0.521	-0.007	0.025	0.020	0.076	-0.017	0.042	0.017	0.286	-0.010
Mai	0.124	0.012	0.310	-0.010	0.095	0.015	0.199	-0.013	0.030	0.018	0.241	-0.013
Juin	0.244	0.010	0.387	-0.007	0.128	0.016	0.199	-0.014	0.045	0.017	0.279	-0.012
Juil	0.289	0.006	0.179	-0.011	0.283	0.012	0.251	-0.010	0.045	0.018	0.266	-0.011
Aout	0.777	-0.002	0.521	-0.006	0.233	0.009	0.227	-0.012	0.029	0.019	0.347	-0.010
Sep	0.241	0.009	0.514	0.006	0.112	0.010	0.765	-0.003	0.028	0.021	0.206	-0.014
Oct	0.812	0.003	0.308	0.007	0.421	0.006	0.848	0.001	0.022	0.021	0.330	-0.008
Nov	0.104	0.018	0.823	0.002	0.403	0.008	0.640	-0.004	0.019	0.021	0.234	-0.011
Dec	0.039	0.020	0.124	-0.017	0.062	0.016	0.524	-0.006	0.045	0.022	0.293	-0.012
Annuelle	0.006	0.018	0.194	-0.010	0.179	0.009	0.093	-0.013	0.007	0.019	0.194	-0.010

La variabilité temporelle des scores des composantes principales (avec rotation) pour les indices SPI et RDI avec les trois échelles de temps par rapport à la période d'étude de 34 ans a montré que les deux indices se comportent de manière similaire et cohérente pour toutes les échelles de temps et ils identifient généralement les mêmes événements de sécheresse ou d'humidité avec les mêmes magnitudes (Fig. 4.23).

Les résultats observés dans la figure 4.20 complètent ceux de l'analyse de tendance réalisée à l'aide du test MMK et de la pente de Sen.

La sécheresse semble diminuer dans la région Nord identifiée par la première composante (RCP-1) et celle du Sud identifiée par la deuxième composante (RCP-2), cette diminution est légèrement élevée dans la zone Nord (RCP-1) ainsi pour le SPI par rapport à la deuxième zone. Ces différences restent tout de même négligeables, car elles peuvent être observées en comparant les équations de ligne de tendance incluses dans la figure (4.23).

Bien que les tendances soient bien visibles, il arrive qu'elles soient généralement non significatives en exception celles enregistrées avec SPI-3 et -12 pour la première composante.

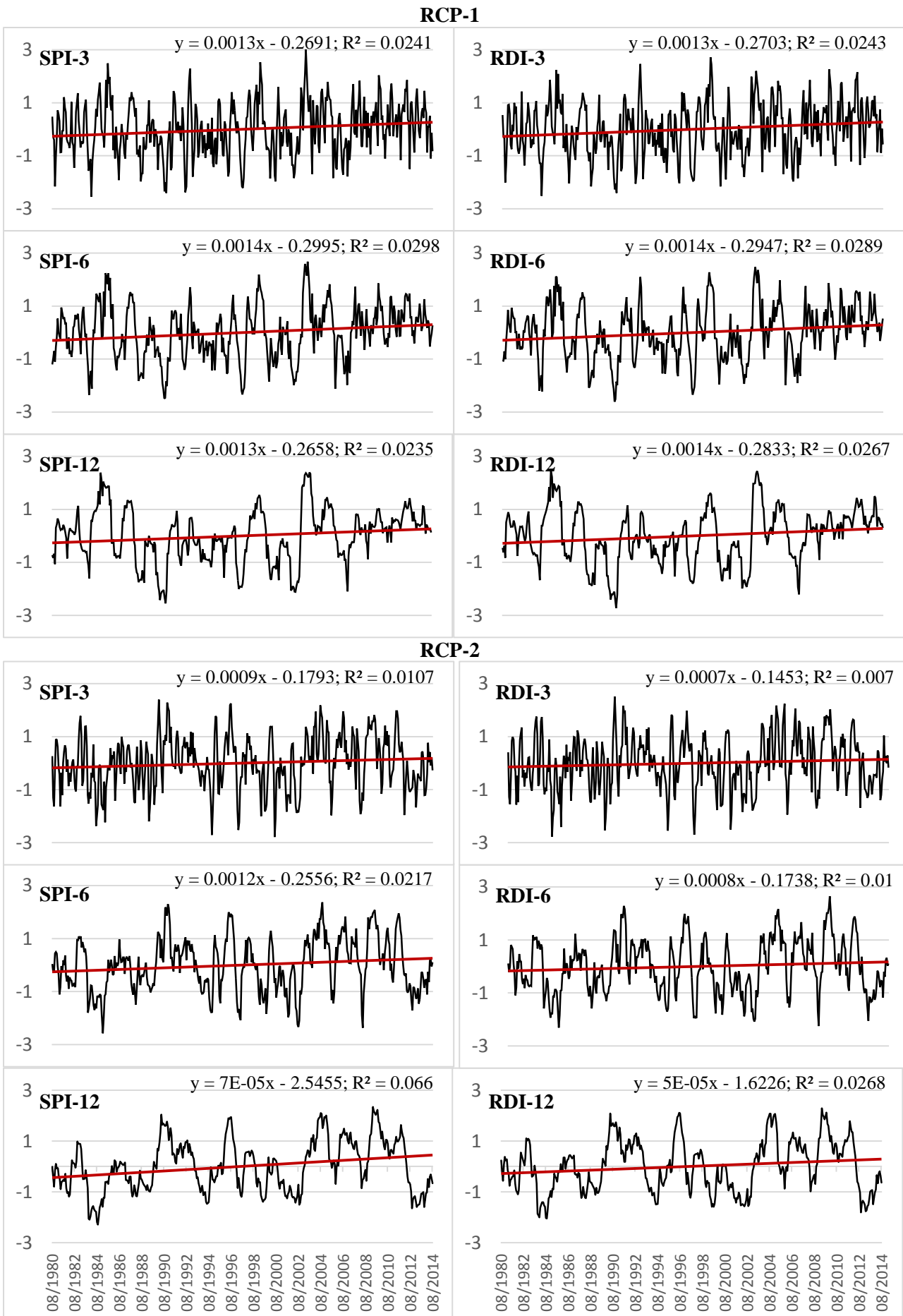


Fig. 4.23. Variabilité des scores CP rotatives de SPI et RDI pour les échelles de temps de 3, 6 et 12 mois pour la période 1980-2014 (Merabti et., al 2017b).

4.2.3. Les fréquences des événements secs et humides par rapport aux composantes principales rotatives (RCP).

Pour détailler sur la connaissance et l'identification des différences entre l'indice RDI et celui de SPI, la fréquence des classes des événements secs et humides représentée dans la figure (4.24) pour les deux composantes principales rotatives a été calculée. Les résultats montrent en général que les indices SPI et RDI se comportent de manière similaire en matière de nombre d'événements secs et humides par classe de sévérité.

Par rapport à la première composante RCP-1, on peut noter que les événements de sécheresse extrêmes et sévères sont plus souvent identifiés avec l'indice SPI à l'échelle de temps de trois mois tandis que les événements de sécheresse sévères et modérés sont plus fréquents en ce qui concerne l'échelle de temps de 12 mois, tandis qu'aucune différence n'a été remarquée entre les deux indices pour l'échelle de temps de six mois. Les différences pour les événements légèrement secs et légèrement humides sont assez faibles.

Les résultats pour la deuxième composante RCP-2 enregistrent également une légère différence entre les indices, cependant les événements de sécheresse détectés dans la deuxième composante (RCP-2) sont plus nombreux en comparant à la première composante (RCP-1), qui est probablement influencé par l'aridité du climat.

Ces résultats concordent avec ceux relatifs aux fréquences des classes de sécheresse calculées à l'échelle locale et regroupées pour cinq régions avec différence de climat. D'où on a pu montrer que les fréquences des classes de sécheresse détectées avec l'indice RDI sont plus équilibrées avec celles relatives aux événements humides par rapport aux celles identifiées avec l'indice SPI.

On peut au final conclure que l'indice RDI réagit plus uniformément que celui de SPI à l'évaluation des événements de sécheresse et d'humidité observés dans différentes conditions climatiques, soit par rapport aux régions identifiées par l'indice d'aridité ou avec l'analyse en composantes principales

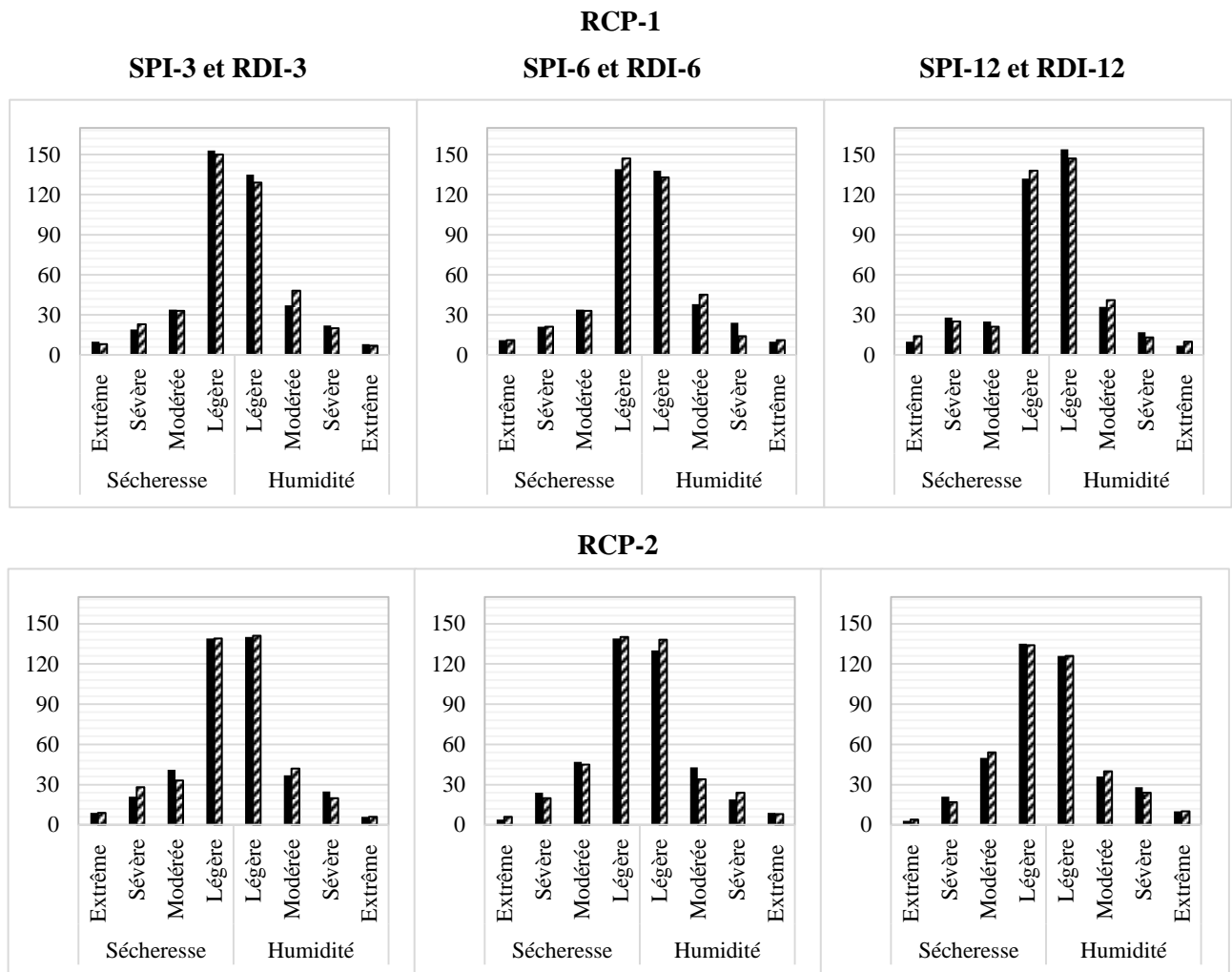


Fig. 4.24. Nombre d'occurrences dans chaque catégorie sèche ou humide des scores CP de RDI (■) et SPI (▨) l'échelle de temps de 3, 6 et 12 mois pour la période 1980-2014. (Merabti et. al 2017b).

Conclusion

Les différents résultats trouvés doivent être explorés davantage en utilisant éventuellement d'autres indices de sécheresse et méthodes de prévision avec principalement une base de données plus longues issues de plusieurs sources.

Le SPI semble un indice performant adéquat à toutes les régions et robuste pour les divers climats par rapport aux indices utilisés qui emploient uniquement les précipitations comme données. Cependant, l'utilisation de l'indice RDI à donner une analyse plus approfondie au comportement de la sécheresse dans la région.

Le processus Markovien montre la vulnérabilité des plaines de Sud particulièrement celles de Batna et Outaya aux événements de sécheresse, contrairement aux celles de Nord à savoir Annaba et Sétif qui sont moins affectées mais jamais épargnées.

L'analyse spatiale avec la technique d'ACP ne peut pas décrire complètement la variabilité de la sécheresse dans une région d'étude avec une manière très exacte puisque les

événements secs / humides peuvent se produire dans un endroit et pas dans d'autres comme nous avons pu le constater dans la première partie de cette étude, où la sécheresse peut toucher une zone et pas une autre, cependant elle est très utile pour comprendre le comportement général de phénomène à travers l'espace et le temps et peut être un support pour coupler ses résultats avec d'autres ensemble de techniques pour une analyse beaucoup plus approfondie.

La sécheresse semble diminuer dans la région Nord identifiée par la première composante (RCP-1) et celle du Sud identifiée par la deuxième composante (RCP-2), cette diminution est légèrement élevée dans la zone Nord (RCP-1) ainsi pour le SPI par rapport à la deuxième zone. Ces différences restent négligeables, tandis que l'étude des tendances a révélé que même si ces dernières soient bien visibles, il arrive généralement qu'elles ne soient pas significatives.

Conclusion générale

Conclusion générale

Comme nous l'avons susmentionnés dans la littérature, l'Algérie tout comme la plupart de la région méditerranéenne a été affectée par plusieurs séquences de sécheresse rudes et persistantes. En effet, à l'issu des premiers résultats d'analyse de sécheresse en se basant sur l'indice SPI-12, plusieurs épisodes ont touché la région étaient détecter les plus sèvres sont celles enregistrées aux années 1979, 1993,1996 et la plus récente en 2001. Les différents indices utilisés ont tous pu repérer ces évènements, cependant, l'étude comparative entre les sept indices prenant en considération uniquement les précipitations comme données sur les sept plaines, a conduits de déceler les différences et les similitudes et même les limites de performances de chaque indice. Les résultats issus de la comparaison des occurrences de sécheresse des indices à différentes échelles de temps, indique que l'indice des déciles détecte en permanence une grande fréquence des évènements de sécheresse et d'humidité extrême tandis que le pourcentage à la normale (PNI) détecte une très grande fréquence de sécheresse extrêmes pour l'échelle de temps d'un mois. Cette grande fréquence diminue en augmentant l'échelle de temps jusqu'à ce que l'indice ne détecte aucune fréquence de sécheresse extrême à l'échelle de temps de 9 et de 12 de mois. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que ces deux indices, particulièrement le PNI, était élaboré pour l'évaluation de la sécheresse à l'échelle annuelle. Quant aux indices CZI, MCZI, Z-score avec le SPI montrent des résultats plus ou moins similaires sur le pourcentage des évènements secs/humides pour les différentes échelles de temps, par contre, l'utilisation de la régression linéaire a montré que l'indice EDI a une bonne corrélation avec les autres indices beaucoup plus avec SPI à l'échelle de temps d'un mois. Cette corrélation prend une tendance à la diminution en allant vers les échelles de temps les plus grandes. Ce résultat peut être expliqué par le fait que cet indice a été développé pour surveiller la sécheresse météorologique et il plus performant à l'échelle journalière (Akhtari et al. 2001). Contrairement à l'indice EDI, on note aussi une bonne corrélation entre le SPI et respectivement le Z-score MCZI, et CZI. Elle augmente en allant vers les échelles de temps les plus élevées. Néanmoins, le CZI et le MCZI détectent plusieurs valeurs négatives dépassant la magnitude à titre d'exemple -4.5 au moment où l'indice SPI et Z-score détectent une magnitude de -1.6. Cet état se reproduit plus souvent pour les échelles de temps faibles et beaucoup plus avec l'indice CZI. Tandis que l'indice MCZI, qui est la version améliorée de premier, détecte moins de valeurs négatives. Ces résultats concordent exactement avec ceux trouvés par (Wu et al. 2001). Ensuite, la comparaison avec l'indice Z-score, qui est souvent

confondu avec l'indice SPI (Hayes 2000), détecte plus d'évènement humide que sec par rapport aux SPI.

L'étude de probabilité d'apparition de sécheresses sur les sept plaines, était élaborée en se basant sur les résultats de SPI-12 pour l'échelle annuelle et SPI-3 pour l'échelle saisonnière, à l'échelle annuelle l'utilisation des chaînes de Markov d'ordre I montre que la probabilité d'avoir deux évènements secs successifs et plus grands dans les plaines du Sud situées dans un climat plus aride particulièrement à Batna à 68 % et à Outaya 69 % contrairement qu'aux plaines du Nord où cette probabilité ne dépasse pas les 44 % à Sétif et 48 % à Annaba. Il est à noter aussi que la Meskiana connaît une probabilité importante de l'ordre de 67.7 %. Les résultats pour l'échelle saisonnière penche vers la même conclusion, plus on s'éloigne de la mer vers l'intérieur du pays plus la probabilité d'avoir des séquences sèches successives augmente, la plus remarquable en Hiver où la probabilité a atteint plus de 70 % d'avoir deux hivers secs successifs à la plaine de Batna, tandis qu'à Annaba ne dépasse pas les 42 % pour la même saison. Quant au processus du deuxième ordre, à l'échelle annuelle, des résultats similaires ont été notés où la probabilité d'avoir trois années sèches successives atteint les 72 % à Batna et 70 % à Meskiana toujours, tandis que la probabilité est moins élevée pour les plaines du Nord d'Annaba et Sétif avec respectivement 45.5 %, 40 %, la différence entre les deux processus se reflète à l'échelle saisonnière, particulièrement en Hiver, la saison la plus pluvieuse qui affecte le plus la pluviométrie de l'année. L'utilisation des chaînes de Markov a montré une grande vulnérabilité des plaines du Sud aux sécheresses spécialement celles de Batna et de Meskiana, comparées aux plaines qui se trouvent dans les régions les plus humides (Annaba et Sétif). Ce résultat servira comme outil d'aide à la décision qui pourrait être utilisées par les services gestionnaires des ressources en eau.

Les indices SPI et RDI, avec des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois, ont été comparés à l'échelle locale. Les deux indices ont montré des résultats assez similaires et cohérents à travers leurs applications à cinq endroits ayant différents types de climat. Seules de légères différences entre les indices ont été identifiées, étant donné que les coefficients de régression étant généralement plus élevés et plus proches de 1 pour l'échelle de temps à trois mois. Pour les zones arides et semi-arides, le SPI identifie un plus grand nombre d'évènements de sécheresse tandis que pour les climats plus humides, les deux indices identifient plus d'évènements humides. Ce comportement peut indiquer que, pour les climats subhumides, les épisodes de sécheresse et d'humidité sont essentiellement liés aux précipitations, ce qui fait que l'ETP joue un rôle mineur dans la distinction des RDI et des SPI. Les différences entre les

emplacements par rapport à la variation temporelle de RDI et de SPI calculées avec toutes les échelles de temps montrent qu'elles dépendent de l'aridité ou de l'humidité du climat.

Ces conditions sont influencées par le climat local qui varie énormément dans la région en raison de la distance à la mer et les grandes montagnes de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien qui influent sur les précipitations et les masses d'aires. Pour les emplacements humides et subhumides, RDI et SPI ont généralement identifié plus d'événements humides, SPI trouvant plus d'événements que RDI classés comme humides modérée ou sévère / extrême. Par rapport aux zones semi-arides et arides, le SPI a identifié plus de sécheresse que d'humidité, tandis que RDI identifie la même fréquence pour les deux types d'événements, bien que RDI ait identifié un peu plus de sécheresses dans la zone aride. Les résultats analysés ci-dessus permettent de percevoir la forte cohérence des résultats de RDI et de SPI et l'avantage possible de l'utilisation d'ETP. Ces conclusions sont compatibles avec celles de la littérature citée, mais elles sont nécessairement différentes en raison de la nature des données utilisées dans d'autres études et de leurs étendues spatiales et temporelles. On peut conclure que d'autres études sur la région, sont nécessaires et recommandées pour mieux évaluer les différences entre les indices de sécheresse dans différents climats. Une comparaison approfondie des comportements de sécheresse et d'humidité dans le Nord-ouest et le Nord-est Algérien est également essentielle, en utilisant éventuellement d'autres indices incluant l'ETP et qui tiennent en compte les influences des indices de circulation atmosphérique.

La variabilité spatiale et temporelle des sécheresses dans le Nord-est de l'Algérie a été étudiée avec les indices SPI et RDI calculés avec les échelles de temps de 3, 6 et 12 mois. La distribution spatiale des sécheresses et d'humidité ont été obtenus en appliquant l'analyse en composantes principales ACP en mode S avec rotation Varimax. Les résultats pour tous les indices ont montré l'existence de deux sous-régions ayant des profils différents par rapport à la variabilité de la sécheresse. La première composante a identifié la région Nord, marquée par un climat humide et subhumide où les précipitations annuelles sont plus élevées. La deuxième composante a identifié la région Sud, caractérisée par un climat semi-aride et aride. Cette distribution spatiale est stable pour les différentes échelles de temps.

Une analyse de tendance a été appliquée aux scores des deux composantes principales retenues CP-1 et CP-2 en se basant sur le test MMK pour un intervalle de confiance de 95% et la pente de Sen, qui a fourni l'ampleur des tendances de la sécheresse. Les résultats obtenus pour les deux indices en utilisant les séries temporelles de 1979-80 à 2013-14 ont révélé des tendances positives mais généralement non significatives dans les deux sous-régions, contredisant ainsi les tendances de de l'augmentation de sévérité des sécheresses observées

dans le Nord-ouest de l'Algérie. Les résultats relatifs à l'application de SPI et de RDI ont montré une cohérence dans l'identification des tendances et de leur ampleur. Lorsque l'analyse des tendances a été appliquée aux scores des CP du SPI calculés pour la période 1960-61 à 2013-14, les résultats ont montré des tendances plus élevées dans RCP-1, révélant probablement que la sévérité et l'occurrence de la sécheresse diminuent au Nord qui est humide. Cela semble être plus important dans les mois pluvieux pour les échelles de temps de 3 et 6 mois, et pour tous les mois après avec SPI-12.

Il est probable que la sélection de la fenêtre temporelle soit importante pour évaluer les changements dans la variabilité temporelle de la sécheresse. On peut finalement conclure que le RDI réagit plus uniformément que SPI à l'évaluation des événements de sécheresse et d'humidité dans différentes conditions climatiques. Cependant, D'autres études sont nécessaires pour évaluer la stabilité de la variabilité spatiale de la sécheresse en utilisant d'autres ensemble de données plus longues permettant l'évaluation des tendances pour différentes périodes et en utilisant d'autres indices de sécheresse, tels que l'indice PDSI.

Références

Références

- Agence Nationale des ressources Hydrauliques (2002)** Carte d'évapotranspiration potentielle du Nord de l'Algérie au 1/500 000, 2 feuilles, notices de 42 p.
- Akhtari R, Morid S, Mahdian MH, Smakhtin V (2009)** Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *Int J Climatol* 29:135–145
- Alexandersson H (1986)** A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.*, 6, 661-675.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998)** Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, FAO, Rome, 300 p
- Banimahd SA, Khalili D (2013)** Factors influencing Markov chains predictability characteristics utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Water Resour Manag* 27:3911–3928
- Barros, AP, Bowden, GJ (2008)** Toward long-lead operational forecasts of drought: An experimental study in the Murray-Darling River Basin, *Journal of Hydrology* 357 (3-4), 349 367.
- Beaulieu C, Ouarda TBMJ, Boulet G, Yagouti (2006)** Étude Comparative De Méthodes D'homogénéisation Des Séries De Précipitations Chaire en hydrologie statistique Hydro-Québec/CRSNG, Chaire du Canada en estimation des variables hydrologiques INRS-ÉTÉ Rapport de recherche.R-849
- Bordi I, Fraedrich K, Gerstengarbe FW, Werner PC, Sutera A (2004)** Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin (Germany). *Theor Appl Climatol* 77:125–138.
- Bordi I, Fraedrich K, Sutera A (2009)** Observed drought and wetness trends in Europe: an update. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:1519–1530
- Boyer JF. (1998)** KronoStat – Statistical time series analysis softwre. UMR 5569 Hydrosiences Montpellier. IRD – Maion des Sciences de l'Eau.)
- Buishand TA (1982)** Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol 58, pp11-57
- Byun HR, Wilhite DR (1999)** Objective Quantification of Drought Severity and Duration *J.of Climate* volume 12 2747- 2756
- Martin B (2009)** Changement climatique et impacte de l'échelle globale à l'échelle locale <https://books.google.dz/books?id=Cf8NwiRuHXsC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>.
- Cinlar E (1975)** Introduction to stochastic processes, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Cutore P, Mauro, GD, Cancelliere A (2009)** Forecasting Palmer index using neural networks and climatic indexes, *Journal of Hydrologic Engineering* 14 (6), 588-595.
- DAI A (2001)** Global Precipitation and Thunderstorm Frequencies. Part II: Diurnal Variations *Journal of Climate* volume 14 pp-1112-1128
- De Luis M, Reventos J, González-Hidalgo JC, Sanchez IR, Cortina J (2000)** Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *Int J Climatol* 20:1451–1469

- Dile YT, Srinivasan R (2014)** Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *J Am Water Resour Assoc* 50:1226–1241
- Dogan S, Berktaç A, Vijay P, Singh VP (2012)** Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 470–471 255–268.
- Fuka DR, Walter MT, MacAlister C, Degaetano AT, Steenhuis TS, Easton ZM (2014)** Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed. *Hydrol Process* 28:5613–5623
- Gibbs WJ, Maher JV (1967)** Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48. Commonwealth of Australia, Melbourne.
- GIEC (2014)** Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Giorgi F, Lionello P (2008)** Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob Planet Chang* 63:90–104
- Goyal MK, Sharma A (2016)** A fuzzy c-means approach regionalization for analysis of meteorological drought homogeneous regions in western India. *Nat Hazards* 84:1831–1847
- Gullett DW, Vincent LA, Sajecki PJF (1990)** Testing for homogeneity in temperature time series at Canadian climate stations. Canadian Climate Centre Rep. 90-4, Atmospheric Environment Service, Downsview, ON, 43 p.
- Guttman NB (1999)** Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *J Am Water Resour Assoc* 35(2):311–322
- Hamadene A (2011)** Contribution à l'analyse de la sécheresse : étude et prévisions : Cas du bassin de l'Oued Isser (w. Boumerdes) Mémoire de Magister ENSH 2011.
- Hamed KH, Rao AR (1998)** A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J Hydrol* 204:182–196
- Hamlaoui-Moulai L, Mesbah M, Souag-Gamane D, Medjerab A (2013)** Detecting hydro climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Nat Hazards* 65:1293–1311
- Hayes MJ (2002)** Revisiting the SPI: Clarifying the Process Drought Network News (1994-2001). Paper 18. Vol. 12, No. 1, Winter 1999–Spring 2000.
- Hoerling M, Eischeid J, Perlwitz J, Quan X, Zhang T, Pegion P (2012)** On the increased frequency of Mediterranean drought. *J Clim* 25:2146–2161
- Hubert P, Carbonnel JP, Chaouche A (1989)** Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitation et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*. vol 110, pp 349-367.
- IISD (2003)** L'Institut international du développement durable 2003 : Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre International Institute for Sustainable Development 2003.

- INRA (2006)** : Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Octobre 2006
- Jaruskova D (1996)** Change-point detection in meteorological measurement. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 1535-1543.
- Jouilil I, Bitar K, Salama H, Amraoui, Mokssit A, Tahiri M (2013)** Sécheresse météorologique au bassin Hydraulique Oum Er Rbia durant Les dernières décennies. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, pp. 109-127.
- Kanellou E, Spyropoulos N, Dalezios N (2012)** Geoinformatic intelligence methodologies for drought spatio- temporal variability in Greece. *Water Resour Manag* 26:1089–1106
- Karl TR, Williams CN Jr (1987)** An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities. *J Climate Appl Meteor* 26:1744–1763.
- Kendall MG (1975)** Rank Correlation Methods. Griffin, London
- Keyantash J, Dracup JA (2002)** The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bul. Am Meteorol Soc* 83:1167–1180
- Khalidi A (2005)** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen – Saida. Thèse de Doctorat Université d'Oran.
- Khalili D, Farnoud T, Jamshidi H, Kamgar-Haghighi AA, Zand-Parsa S (2011)** Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resour Manag* 25:1737–1757
- Khan MI, Liu D, Fu Q, Saddique Q, Faiz MA, Li T, Qamar MU, Cui S, Cheng C (2017)** Projected changes of future extreme drought events under numerous drought indices in the Heilongjiang Province of China. *Water Resour Manag* 31:3921–3937
- Khronostat (1998)** Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques, copyright ORSTOM 1998, IRD 2002
- Kim DW, Byun HR, Choi KS (2009)** Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.021
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006)** World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Z* 15:259–263
- Kousari MR, Dastorani MT, Niazi Y, Soheili E, Hayatzadeh M, Chezgi J (2014)** Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and application of non-parametrical statistical method. *Water Resour Manag* 28:1857–1872
- Laborde JP, Mouhous N (2006)** Hydrolab - Ajustements, Régressions, ACP, Variographie, Université de Nice, Sophia Antipolis.
- Lazri M, Ameur S, Brucker JM, Lahdir M, Sehad M (2015)** Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains. *J Earth Syst Sci* 124:61–70
- Le monde (2013)** http://www.lemonde.fr/planete/article/2013/05/16/plus-de-32-millions-de-personnes-ont-ete-contraintes-a-l-exode-climatique-en-2012_3259712_3244.html

- Lee AFS, Heghinian SM (1977)** A Shift Of The mean Level In A Sequence Of Independent Normal Random Variables-A Bayesian Approche. *Technometrics*. vol n°4, pp 503-506.
- Lemaitre F. (2002)** Test classique de détection de non-stationnarité. Travail de fin d'étude, pp 1-94.
- Lombry T (2017)** Projet Luxorion <http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-terre-ecolo2.htm>
- Lund R, J. Reeves, (2002)** Detection of undocumented changepoints: A revision of the two-phase regression model. *J. Climate*, 15, 2547-2554.
- Maccioni P, Kossida M, Brocca. L, Moramarco. T (2014)** Assessment of the Drought Hazard in the Tiber River Basin in Central Italy and a Comparison of New and Commonly Used Meteorological Indicators DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001094. American Society of Civil Engineers. *J. Hydrol. Eng.*
- Malherbe J, Dieppois B, Maluleke P, Van Staden M, Pillay DL (2016)** South African droughts and decadal variability *Nat Hazards* 80:657–681 DOI 10.1007/s11069-015-1989-y
- Mann HB (1945)** Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- Marc Bied-Charreton (2010)** Sécheresse, désertification et développement en Afrique Cours de master2 – 2007- UVSQ et CERDI Version 10/10/09.
- Maronna R, Yohai V.J (1978)** A bivariate test for the detection of a systematic change in mean. *J. Amer. Statis. Assoc.*, 73, 640-645.
- Martins DS, Raziei T, Paulo AA, Pereira LS (2012)** Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. *Nat Hazards Earth SystSci* 12:1493–1501.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993)** The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conf. Applied Climatology, Am MeteorolSoc, Boston, 179-184.
- Mebarki A (2007)** Une Nouvelle Cartographie Du Déficit Hydrique : Application à l'Est Algérien (et l'Algérie du Nord), *Bulletin des Sciences Géographiques* N°20, pp 39-54.
- Mebarki A, Laborde JP (2014)** Synthèse cartographique des bilans hydriques de l'Algérie du Nord par modèle distribué Eau et Climat au Maghreb2014 pp163-199.
- Meddi M, Assani A, Meddi H (2010)** Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, northwestern Algeria. *Water Resour Manag* 24:3817–3833
- Meddi M, Meddi H, Toumi S, Mehaiguen M (2013)** Regionalization of rainfall in North-Western Algeria. *GeographiaTechnica* 1:56–69
- Medejerab A, Henia L (2011)** Variations Spatio-Temporelles De La Sècheresse Climatique En Algérie Nord-Occidentale. *Courrier Du Savoir – N°11, Mars 2011, Pp.71-79*
- Merabti A, Martins DS, Meddi M, Pereira LS (2017b)** Spatial and time variability of drought based on SPI and RDI with various time scales. *Water Resour Manage.* <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1856-6>
- Merabti A, Meddi M, Martins DS, Pereira LS (2017a)** Comparing SPI and RDI applied at local scale as influencedby climate. *Water Resour Manage.* <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1855-7>
- Mishra AK, Desai VR (2005)** Drought forecasting using stochastic models, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19 (5), 326-339.
- Mishra AK, Singh VP (2010)** A review of drought concepts. *J Hydrol* 391:202–216

- Mishra AK., Desai VR, Singh, VP (2007)** Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model, American Society of Civil Engineering (ASCE) Journal of Hydrologic Engineering 12 (6), 626-638.
- Mohammed R, Scholz M (2017)** Impact of evapotranspiration formulations at various elevations on the reconnaissance drought index. Water Resour Manag 31:531–548
- Moreira E, Mexia JT, Pereira LS (2013)** Assessing homogeneous regions relative to drought class transitions using an ANOVA-like inference. Application to Alentejo, Portugal. Stoch Environ Res Risk Assess 27:183–193
- North GR, Bell TL, Cahalan RF (1982) Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Mon Weather Rev 110:699–706
- Moreira EE, Coelho CA, Paulo AA, Pereira LS, Mexia JT (2008)** SPI-based drought category prediction using loglinear models. J Hydrol 354:116–130
- Moreira EE, Pires CL, Pereira LS (2016)** SPI drought class predictions driven by the North Atlantic Oscillation index using log-linear modeling. Water 8:43. <https://doi.org/10.3390/w8020043>
- Morid S, Smakhtin, V, Moghaddasi, M (2006)** Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. Int. J. Climatol. (in press) DOI: 10.1002/joc.1264
- Mosaedi A, Abyaneh HZ, Sough MG, Samadi SZ (2015)** Quantifying changes in reconnaissance drought index using equiprobability transformation function. Water Resour Manag 29:2451–2469
- Nature Québec (2011)** fiche publiés dans le cadre du projet Agriculture et climat : vers des fermes zéro carbone (www.naturequebec.org/alatonne), portant sur les changements climatiques, les GES et les pratiques de réduction des GES.
- Nicault A, Alleaume S, Brewer S, Carrer M, Nola P, Guiot J (2008)** Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. Clim Dyn 31:227–245
- Núñez JH, Verbist K, Wallis JR, Schaefer MG, Morales L, Cornelis WM (2011)** Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. J Hydrol 405:352–366
- OMM (2006)** Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs OMM-N° 1006 2006, Organisation météorologique mondiale ISBN 92-63-21006-3
- OMM (2013)** Le Climat Dans Le Monde 2001 – 2010 Une décennie d’extrêmes climatiques rapport de synthèse OMM-N° 1119 Organisation météorologique mondiale ISBN 978-92-63-21119-4
- Palmer WC (1965)** Meteorological drought, research paper 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Paulo AA, Martins D, Pereira LS (2016)** Influence of precipitation changes on the SPI and related drought severity. An analysis using long-term data series. Water Resour Manag 30:5737–5757
- Paulo AA, Pereira LS (2006)** Drought concepts and characterization: comparing drought indices applied at local and regional scales. Water Int 31:37–49
- Paulo AA, Pereira LS (2007)** Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. Water Resour Manage 21:1813-1827

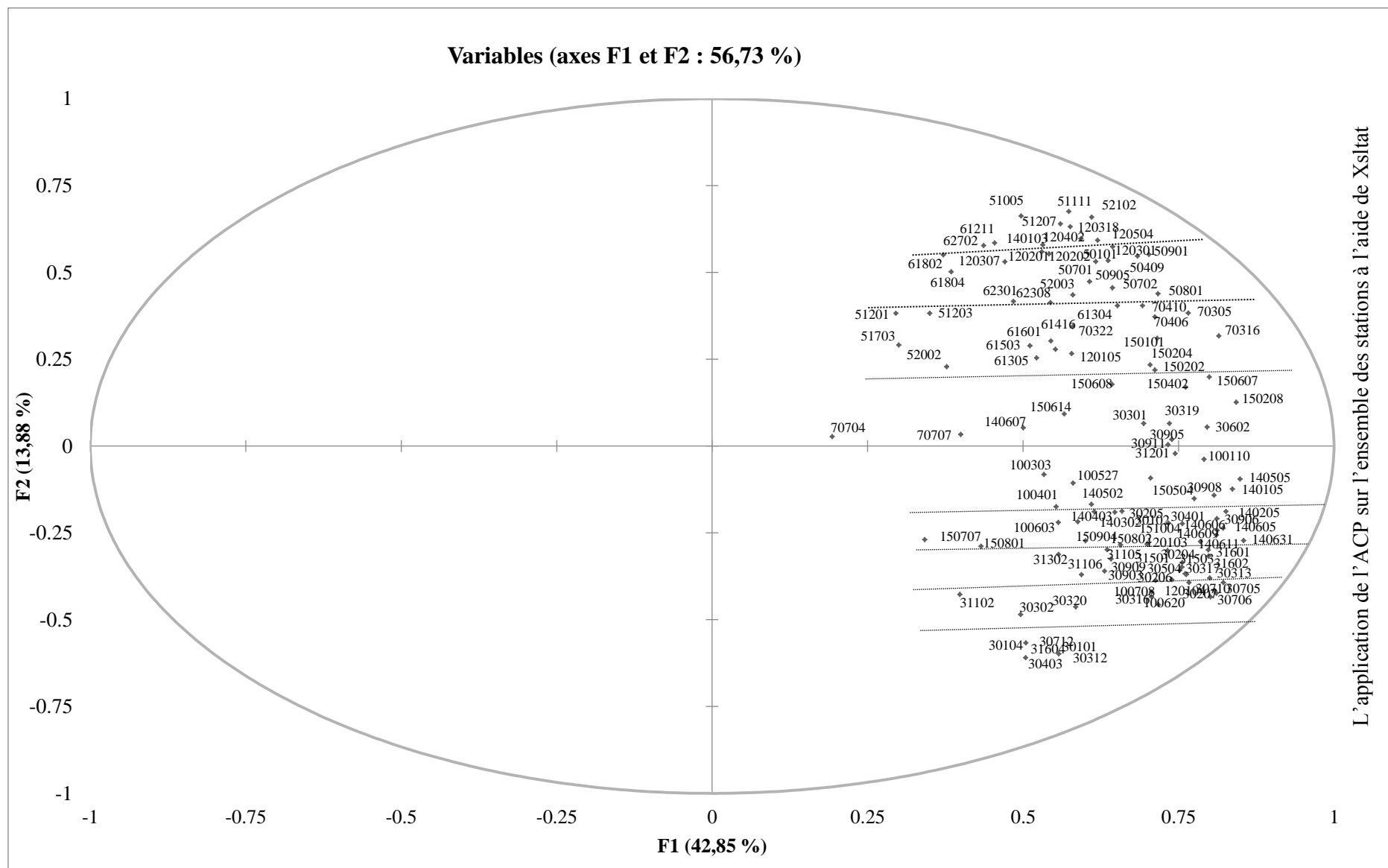
- Pereira LS, Cordery I, Iacovides I (2009)** Coping with water scarcity. Addressing the challenges. Springer, Dordrecht, p 382
- Pettitt A.N (1979)** Illustration of a new test for detecting a shift in mean in precipitation series. *Mon. Wea. Rev* 109, 2040-2045
- Potter KW (1981)** Illustration of a new test for detecting a shift in mean in precipitation series. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2040-2045.
- Puget JL, Blanchet R, Salençon J, Carpentier A, Chapron JY (2010)** Le changement climatique, une synthèse des interventions et discussions prononcées lors du débat sur le climat le 20 septembre 2010 à l'Académie des sciences,
- Raham D (2001)** Les structures spatiales de l'Est algérien Les maillages territoriaux, urbains et routiers THESE Université Mentouri Constantine.
- Rasmussen P (2001)** Bayesian estimation of change points using the general linear model. *Water Resour. Res.*, 37, 2723-2731.
- Raziei T, Martins DS, Bordi I, Santos JF, Portela MM, Pereira LS, Sutera A (2015)** SPI modes of drought spatial and temporal variability in Portugal: Comparing observations, PT02 and GPCC gridded datasets. *Water Resour Manage* 29:487–504.
- Raziei T, Saghafian B, Paulo AA, Pereira LS, Bordi I (2009)** Spatial patterns and temporal variability of drought in Western Iran. *Water ResourManag* 23:439–455
- Rebetez M (2011)** la Suisse se réchauffe effet de serre et changement climatique quatrième édition revue et mis à jour, version rapide du livre page <https://books.google.dz/books?id=JAWWByuflQC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepag&q&f=false>
- Rekacewicz P (2009)** Changements climatiques : le grand tournant par Philippe Rekacewicz, 4 décembre 2009 le blog de " le monde diplomatique" <http://blog.mondediplo.net/2009-12-04-Changements-climatiques-le-grand-tournant>
- Rencher AC (1998)** *Multivariate Statistical Inference and Applications.* John Wiley & Sons, Inc.
- Rezaeianzadeh M, Stein A, Cox JP (2016)** Drought Forecasting using Markov Chain Model and Artificial Neural Networks *Water Resour Manage* (2016) 30:2245–2259
- Saadi S, Todorovic M, Tanasijevic L, Pereira LS, Pizzigalli C, Lionello P (2015)** Climate change and Mediterranean agriculture: impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agric Water Manag* 147:103–115
- Saha S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D, Liu H (2010)** The NCEP climate forecast system reanalysis. *B Am Meteorol Soc* 91:1015–1057
- Santos JF, Pulido-Calvo I, Portela MM (2010)** Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resour Res* 46:W03503. <https://doi.org/10.1029/2009WR008071>
- Sen PK (1968)** Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc* 63:1379–1389
- Seyed AB, Davar K (2013)** Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones

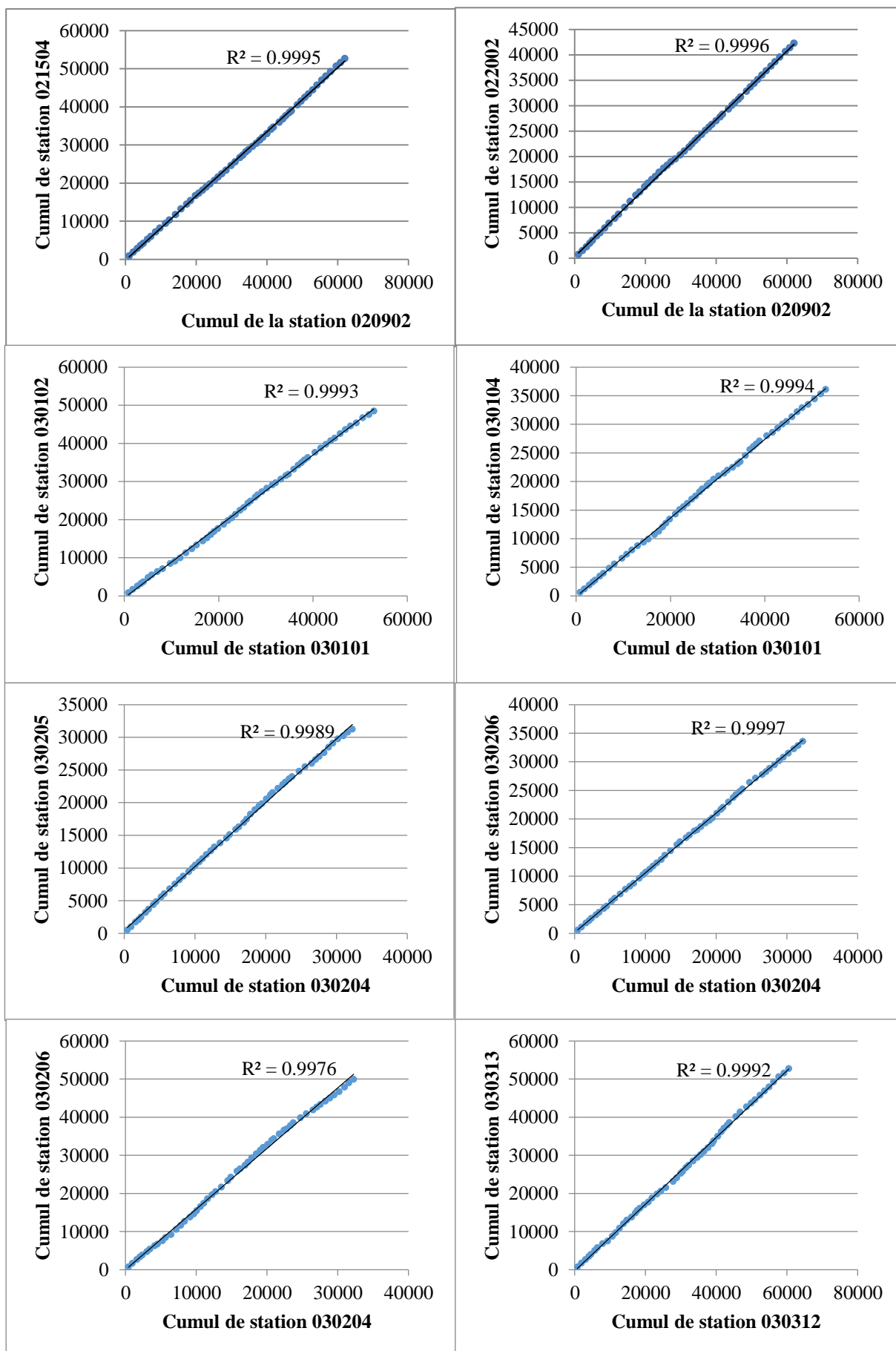
- Sharma S (1995)** Applied Multivariate Techniques. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp 512
- Shokoohi A, Morovati R (2015)** Basinwide comparison of RDI and SPI within an IWRM framework. *Water Resour Manag* 29:2011–2026
- Smakhtin VU, Hughes DA (2007)** Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environ. Model. Softw.* DOI:10.1016/j.envsoft.2006.05.013.
- Sousa PM, Trigo RM, Aizpurua P, Nieto R, Gimeno L, Garcia-Herrera R (2011)** Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:33–51
- Spinoni J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P, Vogt J (2014)** World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *Int. J. Climatol.* 34: 2792–2804.
- Surendran U, Kumar V, Ramasubramoniam S, Raja P (2017)** Development of drought indices for semi-arid region using drought indices calculator (DrinC) – a case study from Madurai District, a semi-arid region in India. *Water Resour Manag.* <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1687-5>
- Taebt S (2008)** Le changement climatique en Algérie orientale et ses conséquences sur la végétation forestière. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine.
- Taibi S, Meddi M, Mahé G, Assani A (2017)** Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *TheorApplClimatol*127: 241–257.
- Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahe G (2013)** Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). In: E Boegh, E Blyth, DM Hannah, H Hisdal, H Kunstmann, B Su, KK Yilmaz (Eds) *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*, IAHS Publ. 359, pp. 191–197.
- Taibi S, Souag D (2011)** Regionalization of drought in northern Algeria using a standardized precipitation index (1936–2010). In: E Ferrari, P Versace (Eds.) *Proc. IV Int. Workshop on Hydrological Extremes from Prediction to Prevention of Hydrological Risk in Mediterranean Countries*. University of Calabria, Cosenza (Italy)
- Talia A (2001)** Evolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de Magister, Institut d'Hydraulique – Centre Universitaire de Mascara.
- Tanasijevic L, Todorovic M, Pizzigalli C, Lionello P, Pereira LS (2014)** Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agric Water Manag* 144:54–68
- Thomas T, Jaiswal RK, Galkate RV, Nayak TR (2016)** Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand international Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.005
- Thorntwaite CW (1948)** An approach toward a rational classification of climate. *GeogrRev* 38(55):94
- Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G (2012)** Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Sci Total Environ* 440:33–41
- Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G (2015)** DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Sci Inf* 8:697–709

- Touati B (2010)** Thèse : Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable p21.
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Attalah S, Baisan C, Aloui A (2008)** Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophys Res Lett* 35:L13705. <https://doi.org/10.1029/2008GL034264>
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Sabir M, Attalah S, Aloui A (2011)** Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim Dyn* 37:237–252
- Tramblay Y, El Adlouni S, Servat E (2013)** Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:3235–3248.
- Tsakiris G (2017)** Drought risk assessment and management. *Water Resour Manag* 31:3083–3095
- Tsakiris G, Kordalis N, Tigkas D, Tsakiris V, Vangelis H (2016)** Analysing drought severity and areal extent by 2D Archimedean Copulas. *Water Resour Manag* 30:5723–5735
- Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H (2007)** Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI) *Water Resour Manage* 21:821–833.
- Tsakiris G, Vangelis H (2005)** Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9/10: 3-11.
- UNEP (1997)** World Atlas of Desertification. 2nd ed. United Nations Environment Programme, Arnold, London, 182 p
- Vangelis H, Tigkas D, Tsakiris G (2013)** The effect of PET method on reconnaissance drought index (RDI) calculation. *J Arid Environ* 88:130–140
- Vangelis H, Spiliotis M, Tsakiris G (2011)** Drought severity assessment based on bivariate probability analysis. *Water Resour Manag* 25:357–371
- Vicente-Serrano SM (2006)** Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resour Manag* 20:37–60
- Vicente-Serrano SM, Begueria S, Lopez-Moreno JI (2010)** A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23:1696–1718
- Weiß M, Flörke M, Menzel L, Alcamo J (2007)** Model-based scenarios of Mediterranean droughts. *Adv Geosci* 12:145–151
- Vincent LA (1998)** A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series. *J. Climate*, 11, 1094-1105. Easterling D.R. and T.C. Peterson, 1995: A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series. *Int. J. Climatol.*, 15, 369-377.
- Weiß M, Flörke M, Menzel L, Alcamo J (2007)** Model-based scenarios of Mediterranean droughts. *Adv Geosci* 12:145–151.
- Willeke G, Hosking, JRM, Wallis JR, Guttman NB (1994)** The national drought atlas, U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Report 94-NDS-4. [Available from U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Casey Building, 7701 Telegraph Rd., Alexandria, VA 223153868.]
- Worqlul AW, Yen H, Collick AS, Tilahun SA, Langan S, Steenhuis TS (2017)** Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological

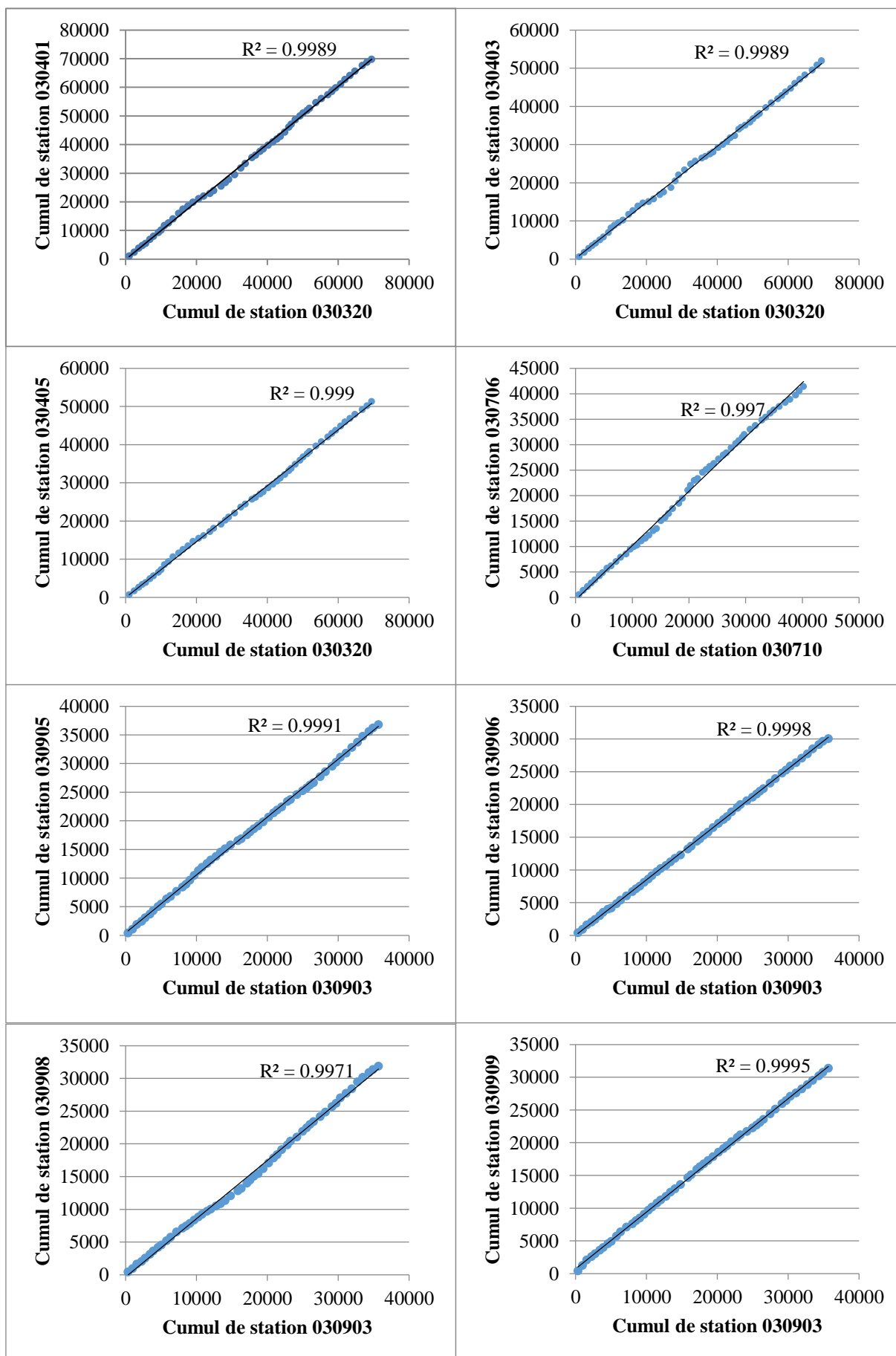
- models, in data scarce regions: the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Catena* 152:242251
- Wu H, Hayes MJ, Weiss A, Hu Q (2001)** An Evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the Statistical Z-Score. *Int. J. Climatol.* 21, 745–758.
- Xu K, Yang D, Yang H, Li Z, Qin Y, Shen Y (2015)** Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. *J Hydrol* 526:253–264
- Yue S, Wang C (2004)** The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour Manag* 18:201–218
- Zarch MAA, Malekinezhad H, Mobin MH, Dastorani MT, Kousari MR (2011)** Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resour Manag* 25:3485–3504
- Zarch MAA, Sivakumar B, Sharma A (2015)** Droughts in a warming climate: a global assessment of standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI). *J Hydrol* 526:183–195
- Zarei AR, Moghimi MM, Mahmoudi MR (2016)** Analysis of changes in spatial pattern of drought using RDI index in south of Iran. *Water Resour Manag* 30:3723–3743
- Zarei AR, Moghimi MM, Mahmoudi MR (2016b)** Parametric and non-parametric trend of drought in arid and semi-arid regions using RDI index. *Water Resour Manag* 30:5479–5500
- Zargar A, Sadiq R, Naser B, Khan FI (2011)** A review of drought indices. *Environ Rev* 19:333–349
- Zeroual A, Assani AA, Meddi M (2017)** Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrol Res* 48, 584–595.
- Zeroual A, Meddi M, Bensaad S (2013)** The impact of climate change on river flow in arid and semi-arid rivers in Algeria. In: *Climate and Land-surface Changes in Hydrology, Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, IAHS Publ. 359*, pp. 105–110.

Annexes

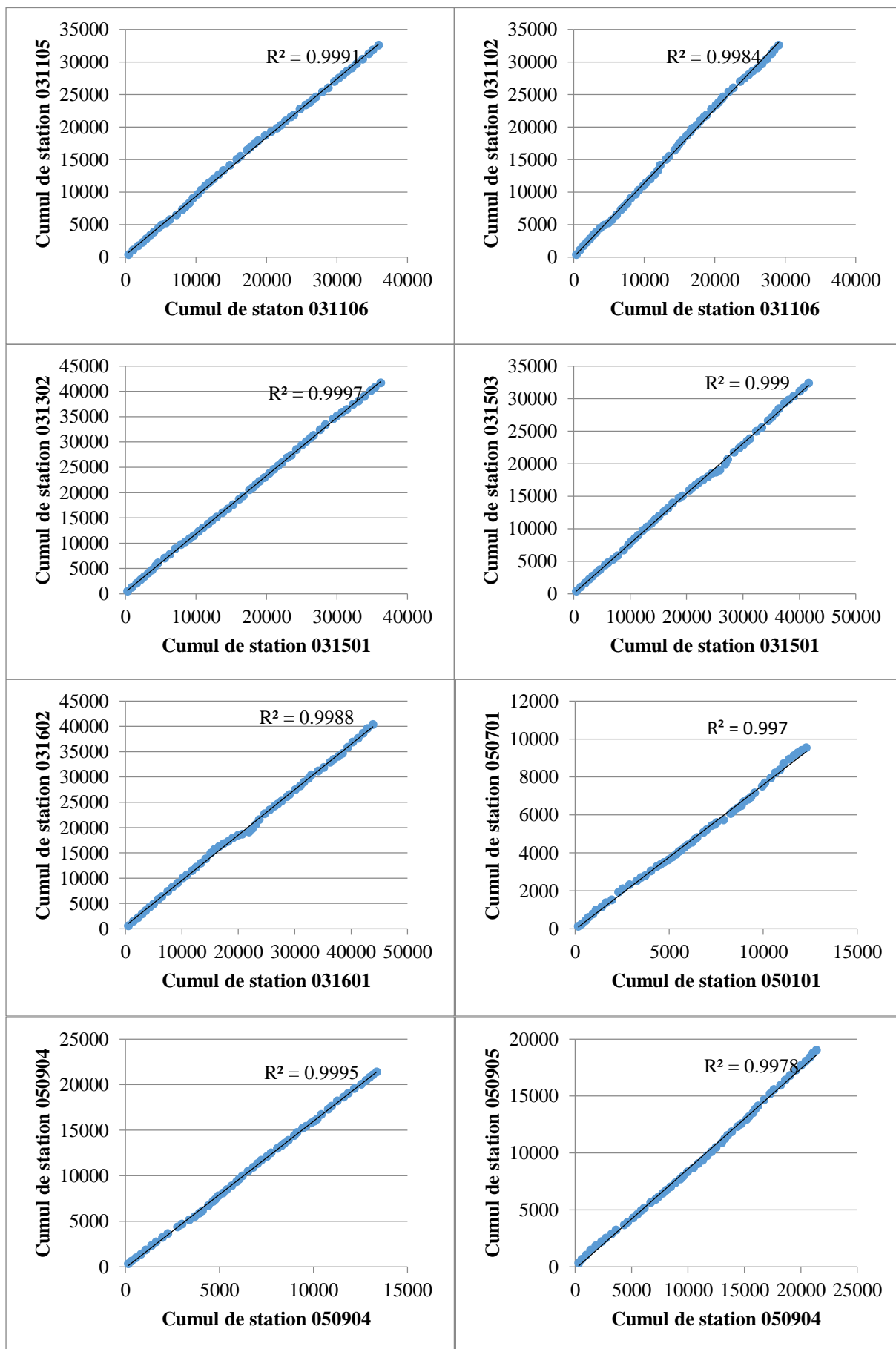




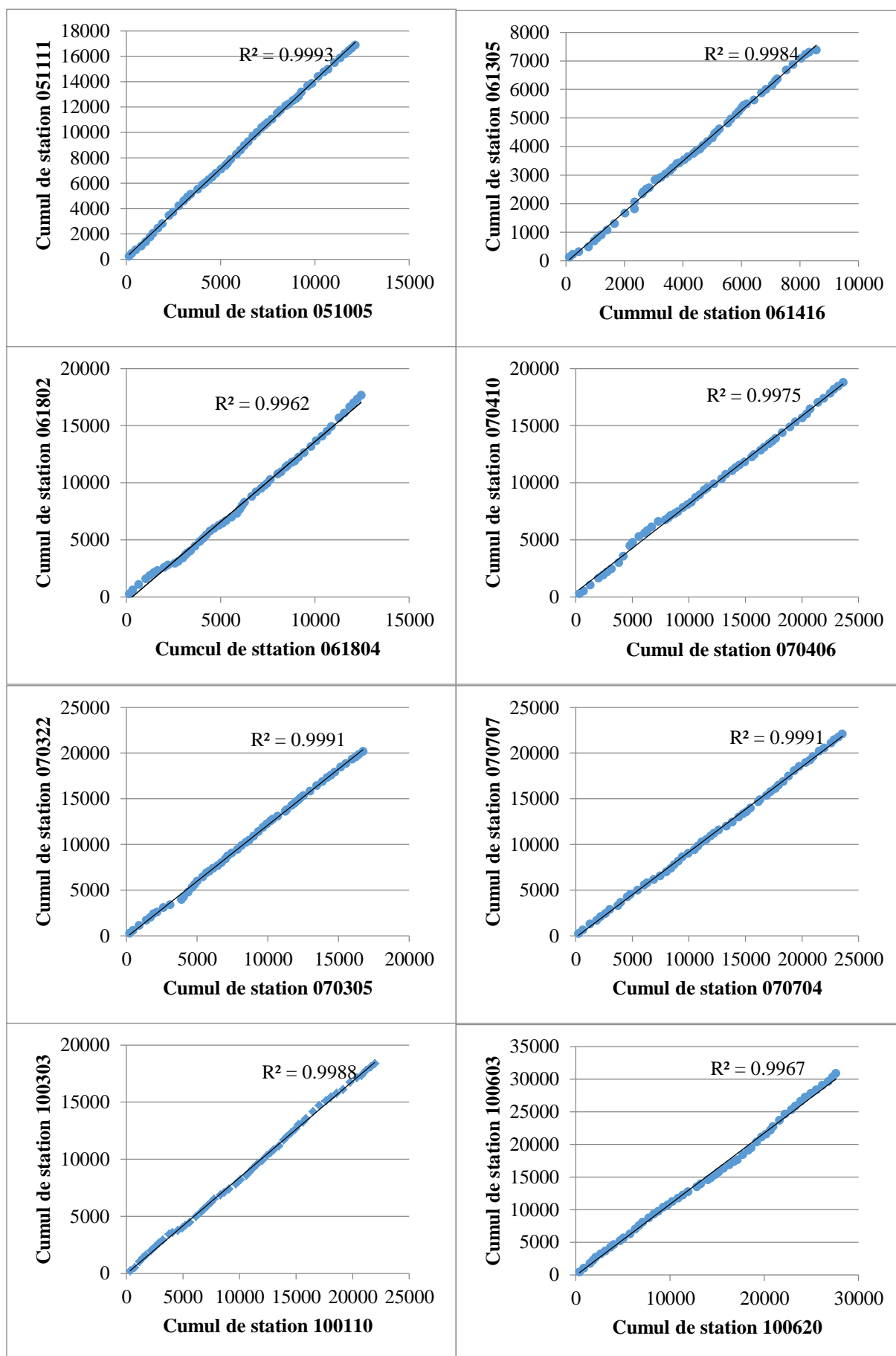
Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



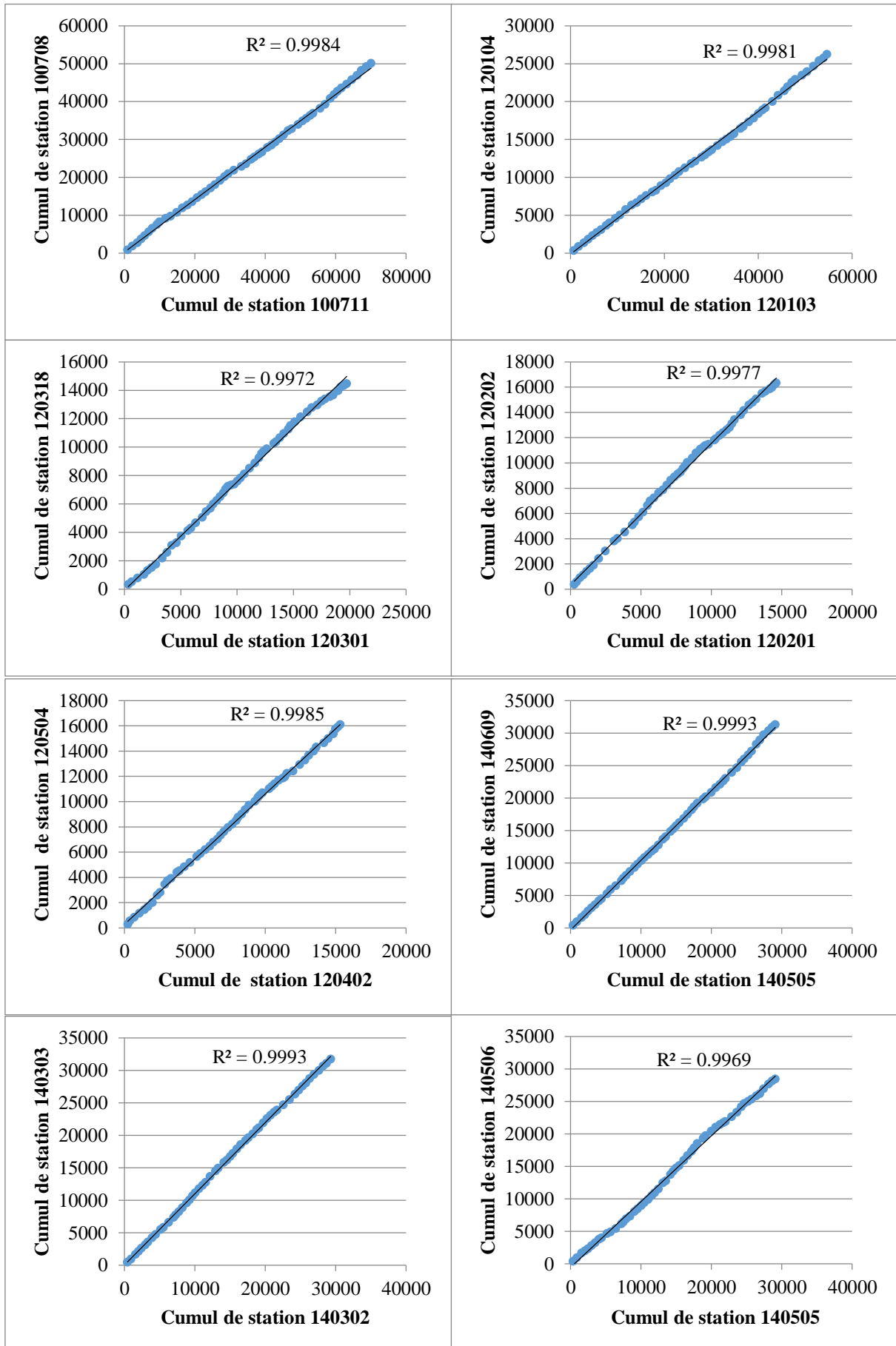
Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



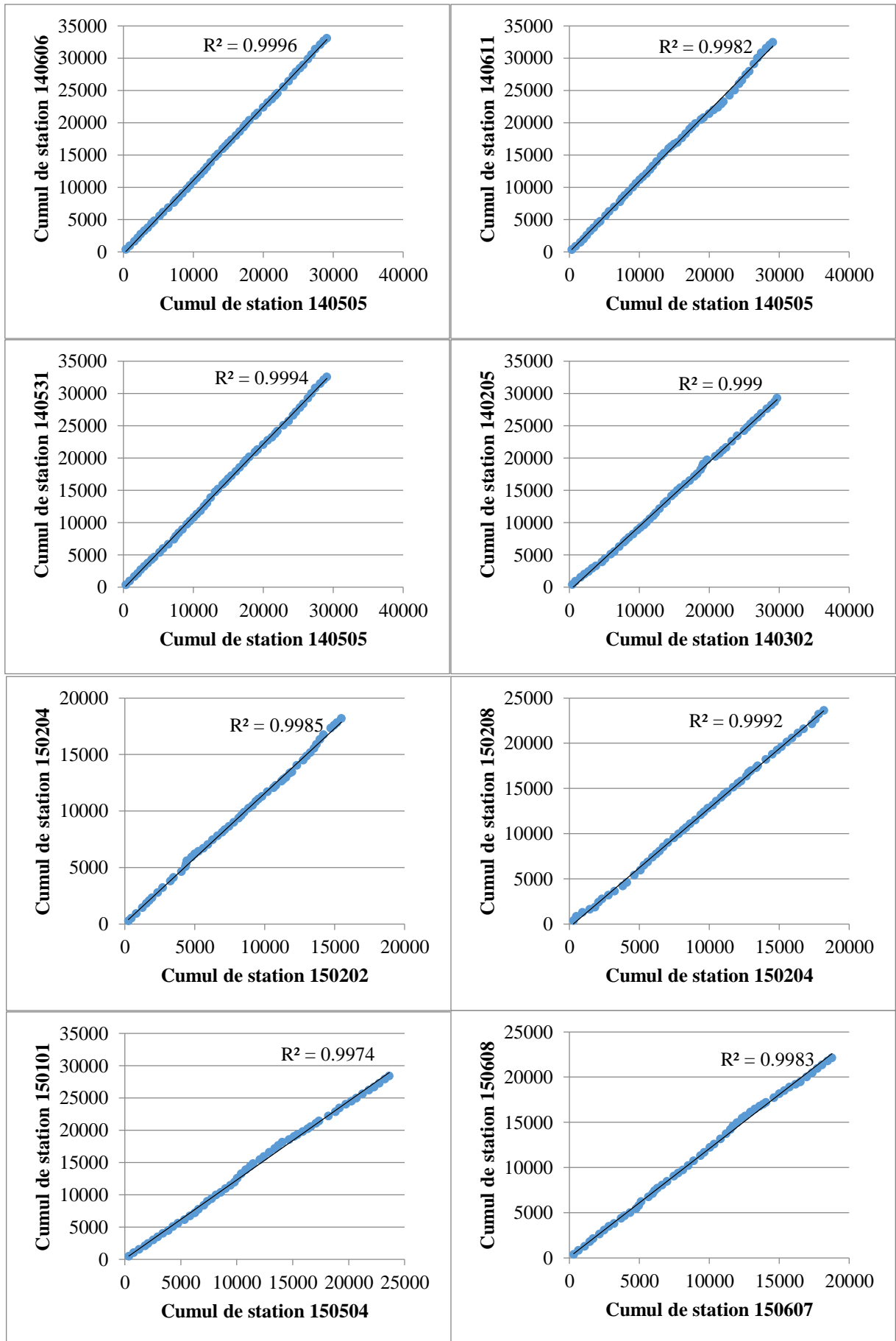
Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



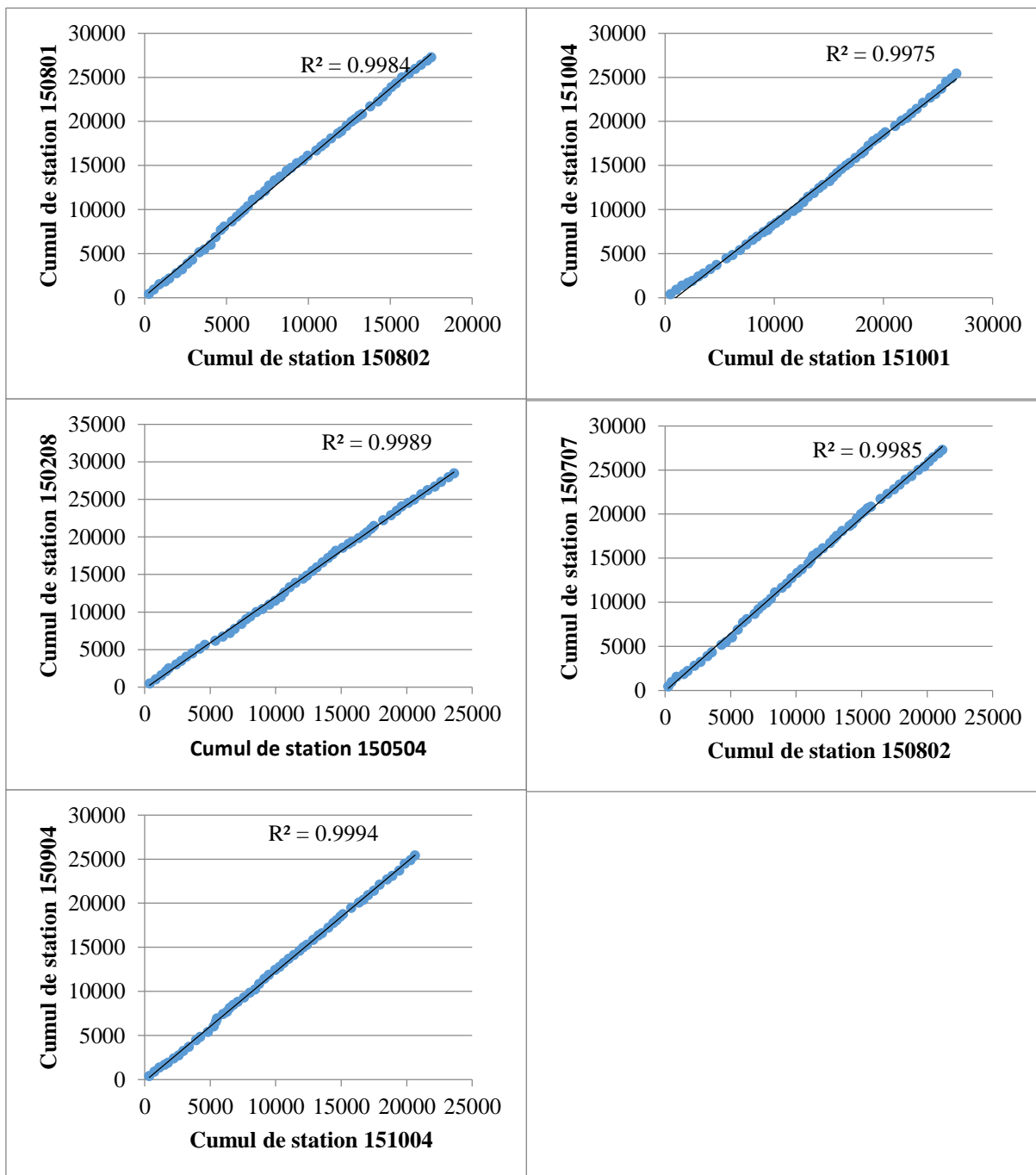
Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations



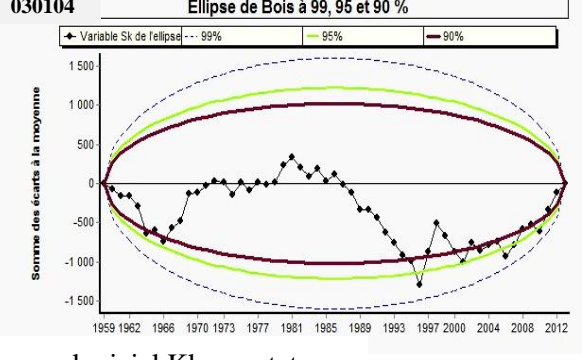
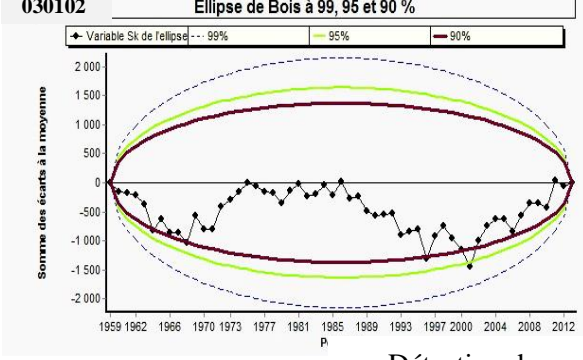
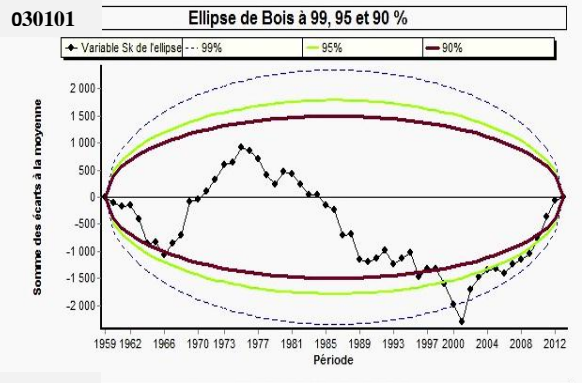
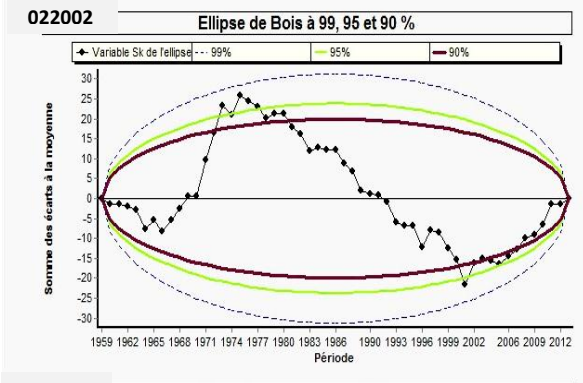
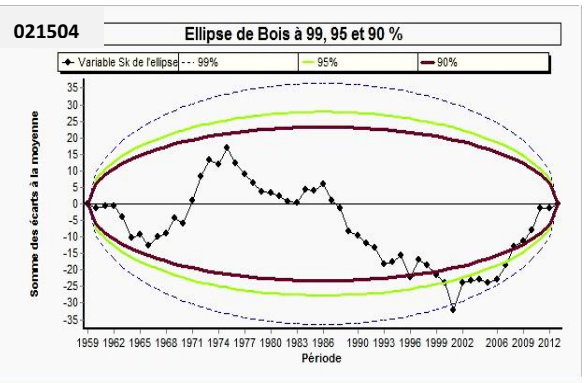
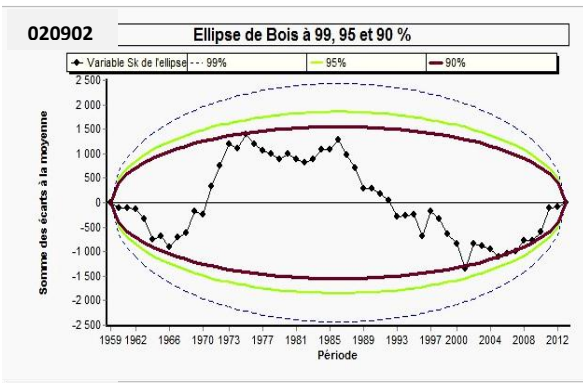
Graphiques de la méthode de double cumul des valeurs annuelles de deux stations

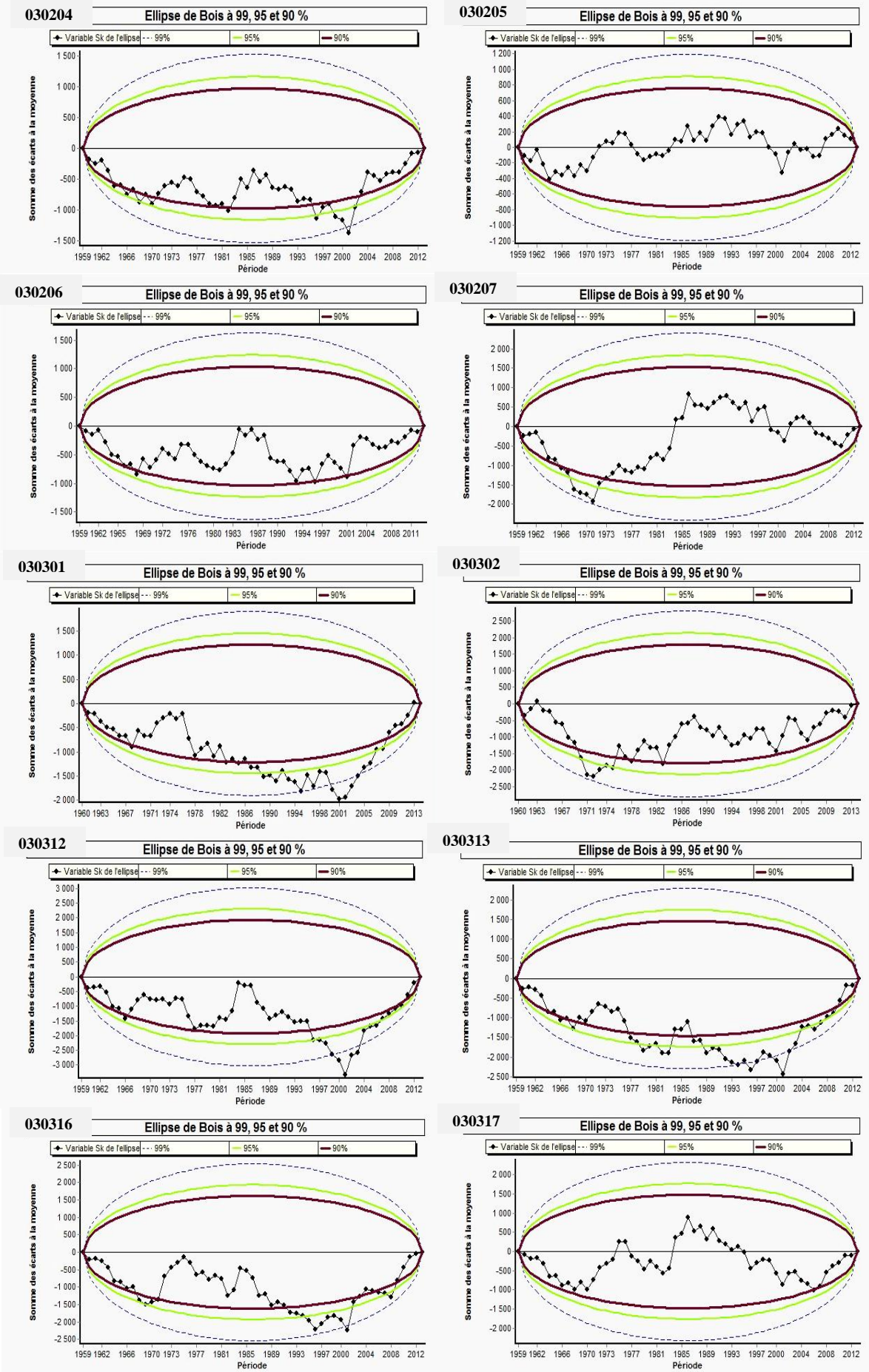
Tableau de vérification de l'homogénéité avec le test de Wilcoxon et simple cumul

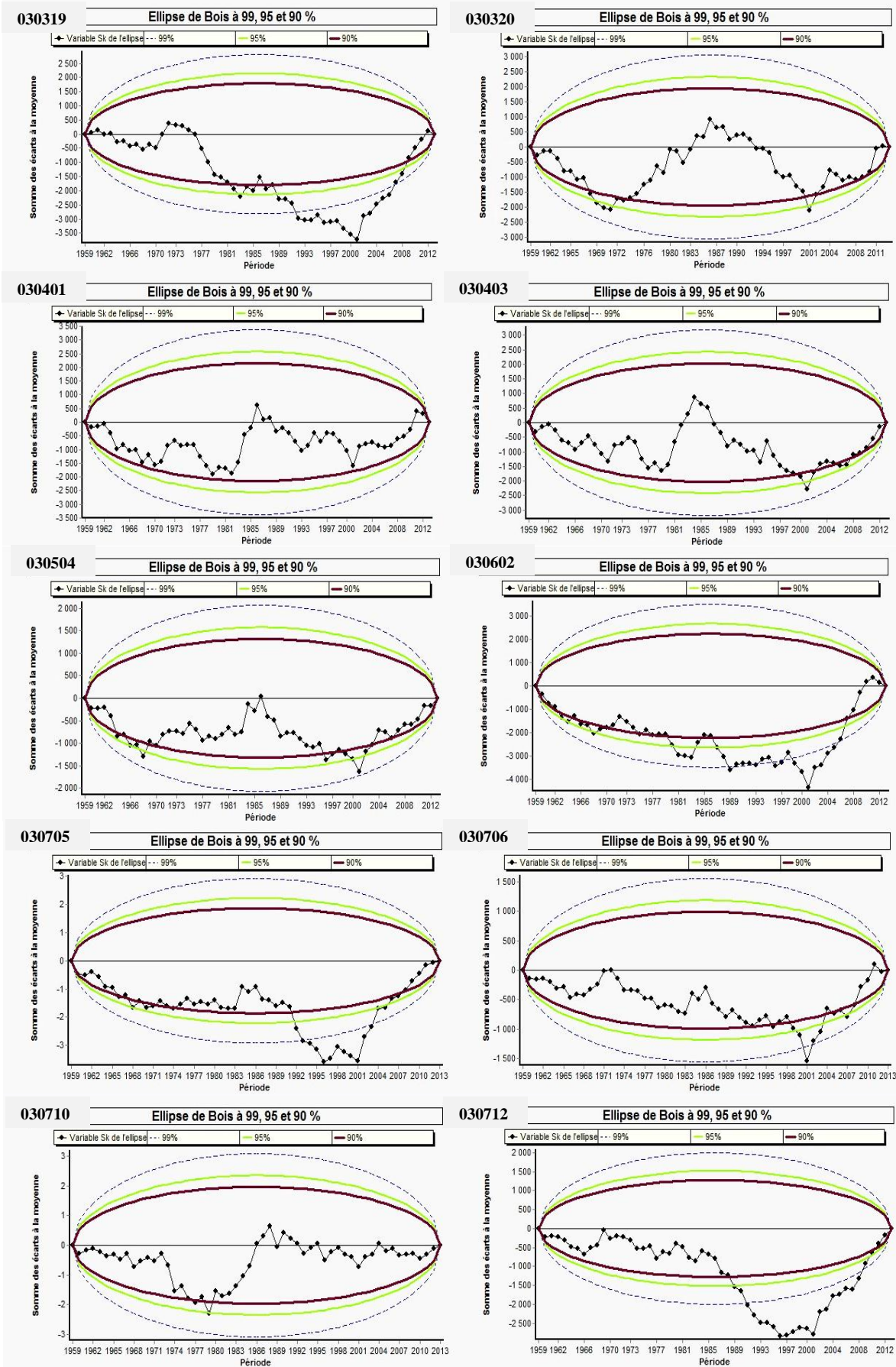
Code de la station	Somme de Wy	Test de Wilcoxon	Méthode de simple cumul
020902	708	Vérifié	Vérifié
021504	717	Vérifié	Vérifié
022002	753	Vérifié	Vérifié
030101	693	Vérifié	Vérifié
030102	605	Vérifié	Vérifié
030104	692	Vérifié	Vérifié
030204	662	Vérifié	Vérifié
030205	676	Vérifié	Vérifié
030206	635	Vérifié	Vérifié
030207	714	Vérifié	Vérifié
030301	611	Vérifié	Vérifié
030302	664	Vérifié	Vérifié
030312	689	Vérifié	Vérifié
030313	620	Vérifié	Vérifié
030316	680	Vérifié	À corriger
030317	723	Vérifié	Vérifié
030319	607	Vérifié	À corriger
030320	724	Vérifié	Vérifié
030401	707	Vérifié	Vérifié
030403	684	Vérifié	Vérifié
030504	678	Vérifié	Vérifié
030602	630	Vérifié	Vérifié
030705	643	Vérifié	À corriger
030706	662	Vérifié	Vérifié
030710	691	Vérifié	Vérifié
030712	669	Vérifié	Vérifié
030903	627	Vérifié	Vérifié
030905	647	Vérifié	Vérifié
030906	615	Vérifié	Vérifié
030908	678	Vérifié	Vérifié
030909	699	Vérifié	Vérifié
030911	616	Vérifié	Vérifié
031102	652	Vérifié	Vérifié
031105	629	Vérifié	Vérifié
031106	714	Vérifié	Vérifié
031201	665	Vérifié	Vérifié
031302	649	Vérifié	Vérifié
031501	666	Vérifié	Vérifié
031503	692	Vérifié	Vérifié
031601	668	Vérifié	Vérifié
031602	735	Vérifié	Vérifié
031604	617	Vérifié	Vérifié
050101	628	Vérifié	Vérifié
050701	687	Vérifié	À corriger
050702	701	Vérifié	Vérifié
050801	681	Vérifié	Vérifié
050901	721	Vérifié	Vérifié
050904	725	Vérifié	Vérifié
050905	605	Vérifié	Vérifié
051005	716	Vérifié	Vérifié

051111	732	Vérifié	Vérifié
051201	727	Vérifié	À corriger
051203	617	Vérifié	À corriger
051207	719	Vérifié	Vérifié
051703	837	Vérifié	À corriger
052002	552	Non Vérifié	Non Vérifié
052003	731	Vérifié	Vérifié
052102	548	Non Vérifié	Non Vérifié
061211	792	Vérifié	Vérifié
061304	775	Vérifié	Vérifié
061305	735	Vérifié	Vérifié
061416	700	Vérifié	Vérifié
061503	718	Vérifié	À corriger
061601	707	Vérifié	À corriger
061802	693	Vérifié	Vérifié
061804	648	Vérifié	Vérifié
062301	739	Vérifié	À corriger
062308	821	Vérifié	Vérifié
062702	827	Vérifié	Vérifié
070305	638	Vérifié	À corriger
070316	746	Vérifié	À corriger
070322	743	Vérifié	À corriger
070406	666	Vérifié	Vérifié
070410	654	Vérifié	À corriger
070704	723	Vérifié	Vérifié
070707	735	Vérifié	Vérifié
100110	639	Vérifié	Vérifié
100303	622	Vérifié	Vérifié
100401	724	Vérifié	À corriger
100403	593	Vérifié	Vérifié
100505	644	Vérifié	Vérifié
100527	696	Vérifié	Vérifié
100603	695	Vérifié	Vérifié
100620	621	Vérifié	Vérifié
100708	763	Vérifié	Vérifié
100711	679	Vérifié	Vérifié
120103	733	Vérifié	Vérifié
120104	672	Vérifié	Vérifié
120105	742	Vérifié	Vérifié
120201	819	Vérifié	À corriger
120202	864	Vérifié	À corriger
120301	697	Vérifié	Vérifié
120307	742	Vérifié	À corriger
120318	708	Vérifié	Vérifié
120402	781	Vérifié	Vérifié
120504	739	Vérifié	À corriger
140103	759	Vérifié	Vérifié
140105	647	Vérifié	À corriger
140205	671	Vérifié	Vérifié
140302	623	Vérifié	Vérifié
140403	669	Vérifié	Vérifié
140502	592	Vérifié	Vérifié
140505	666	Vérifié	Vérifié

140605	644	Vérifié	Vérifié
140606	645	Vérifié	Vérifié
140609	618	Vérifié	Vérifié
140611	700	Vérifié	À corriger
140631	670	Vérifié	Vérifié
150101	636	Vérifié	Vérifié
150202	788	Vérifié	Vérifié
150204	745	Vérifié	Vérifié
150208	720	Vérifié	Vérifié
150402	657	Vérifié	Vérifié
150504	736	Vérifié	Vérifié
150607	696	Vérifié	Vérifié
150608	717	Vérifié	Vérifié
150614	773	Vérifié	Vérifié
150707	740	Vérifié	Vérifié
150801	698	Vérifié	Vérifié
150802	758	Vérifié	Vérifié
150904	660	Vérifié	Vérifié
151001	825	Vérifié	Vérifié
151004	678	Vérifié	Vérifié

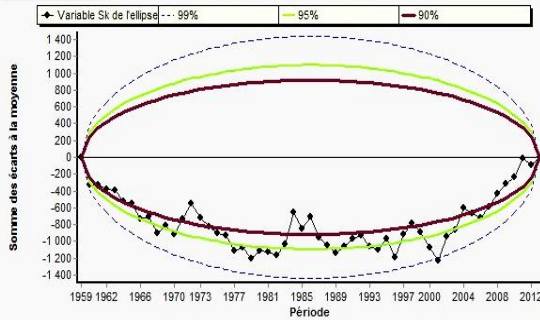




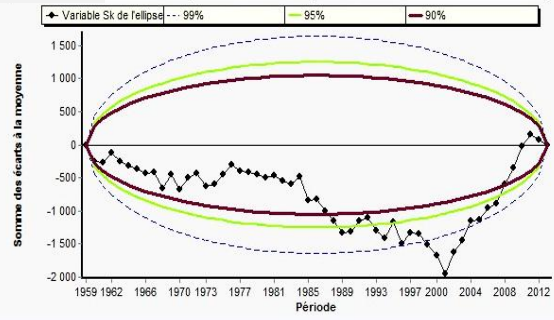


Détection de ruptures – logiciel Khronostat-

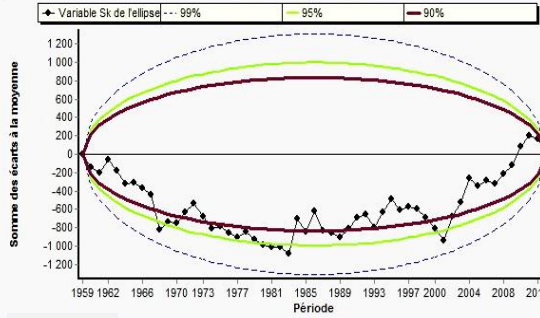
030903 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



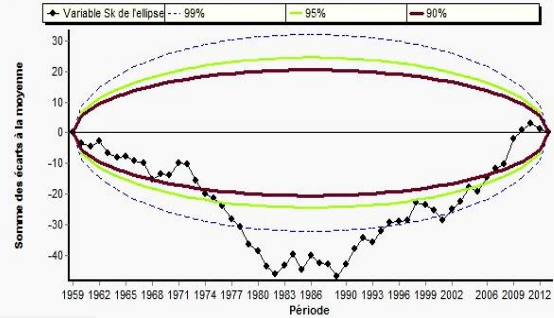
030905 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



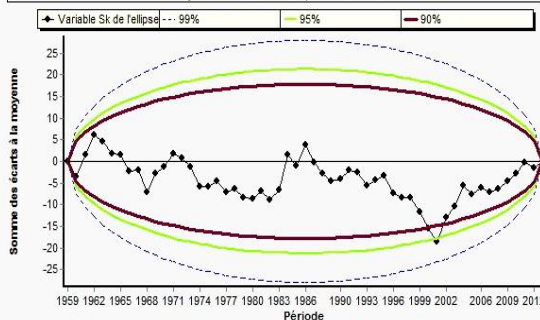
030906 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



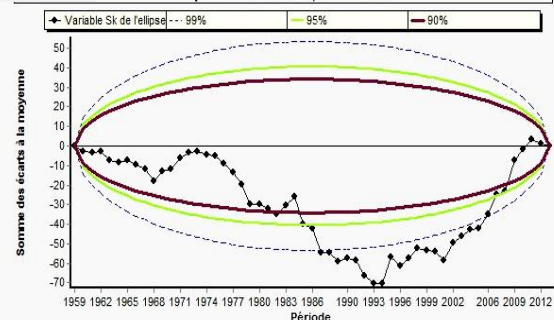
030908 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



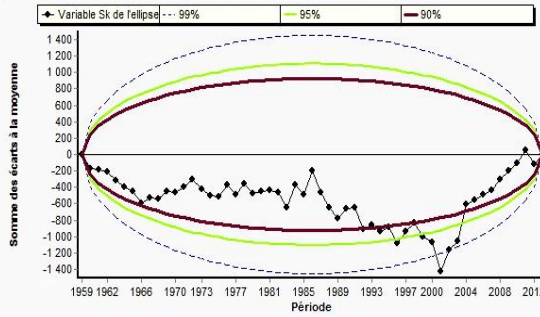
030909 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



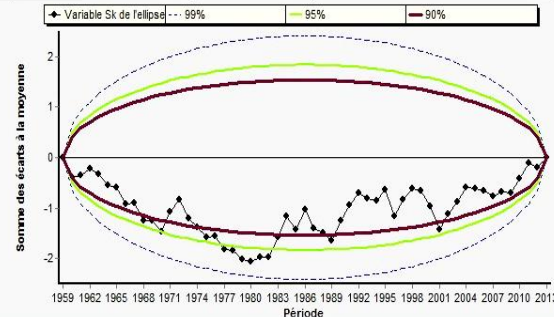
030911 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



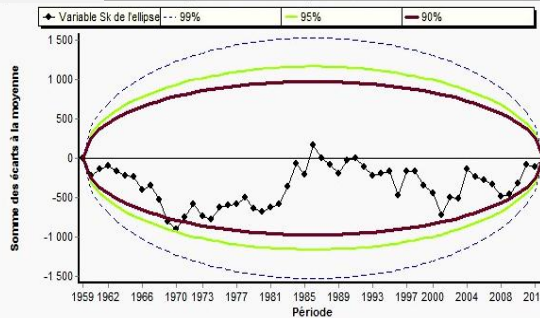
031102 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



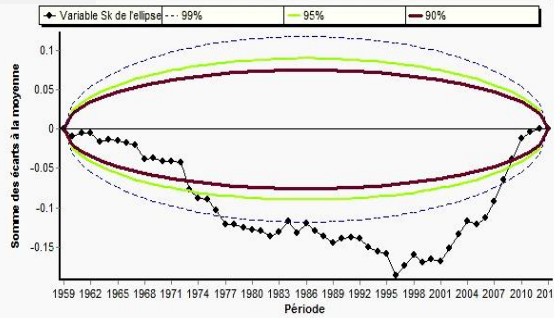
031105 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



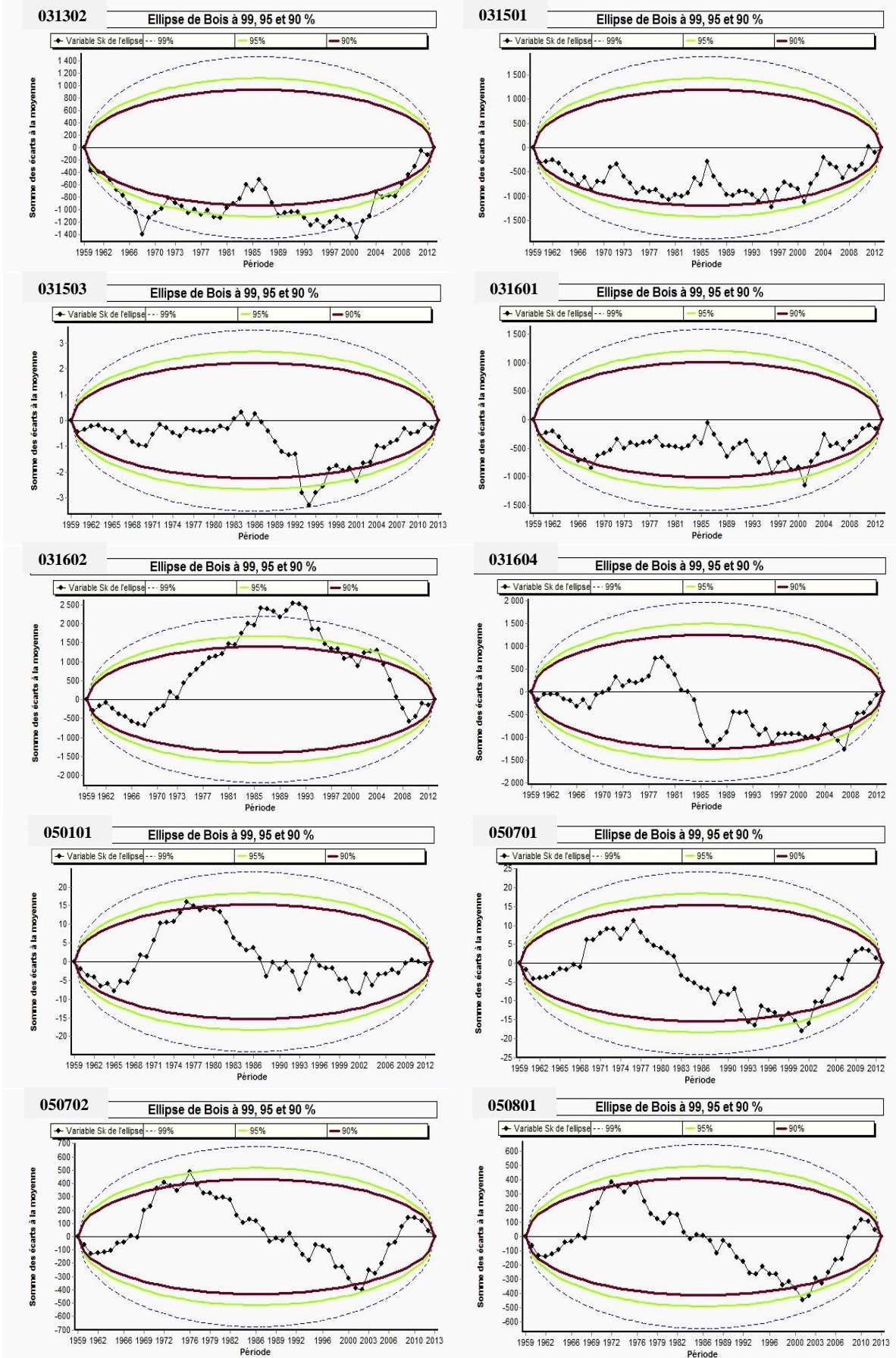
031106 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



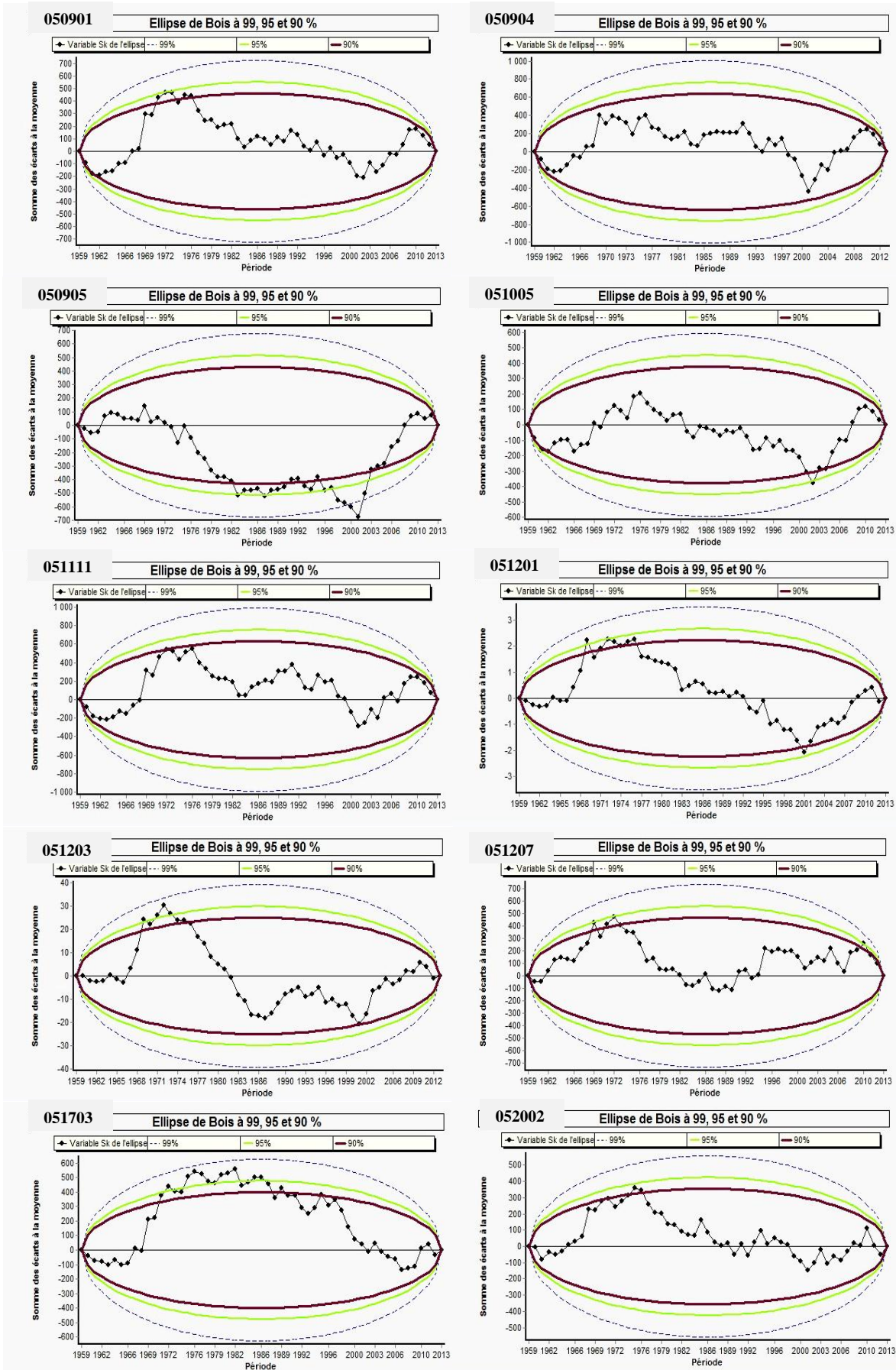
0312 Ellipse de Bois à 99, 95 et 90 %



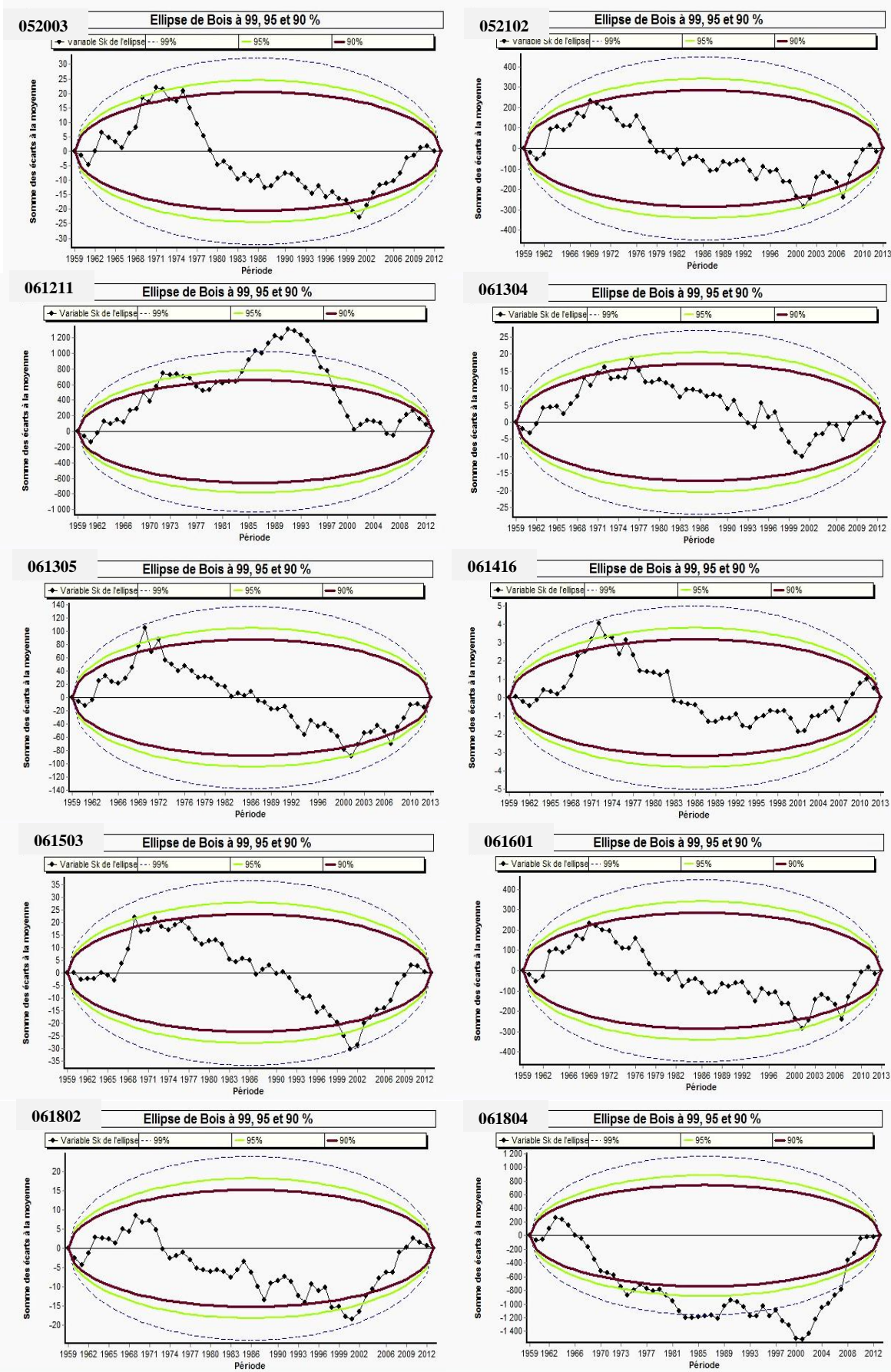
Détection de ruptures – logiciel Chronostat-



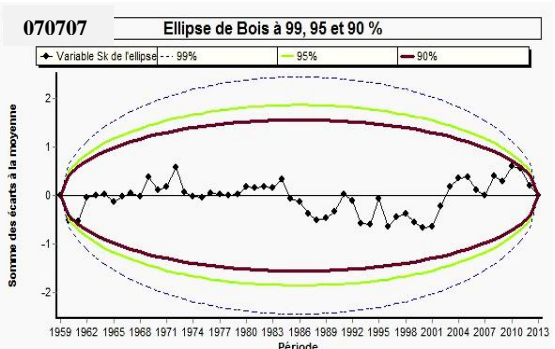
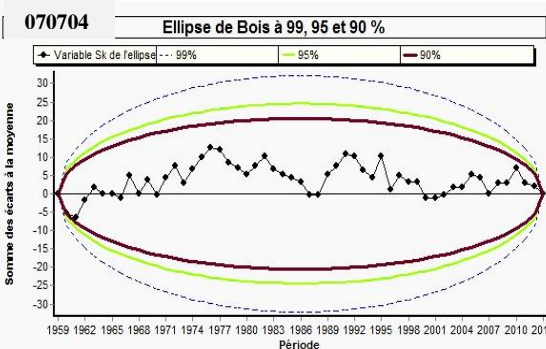
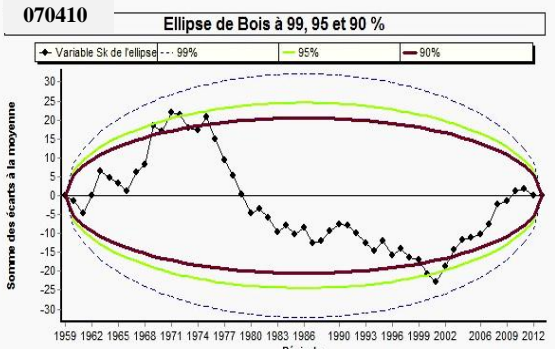
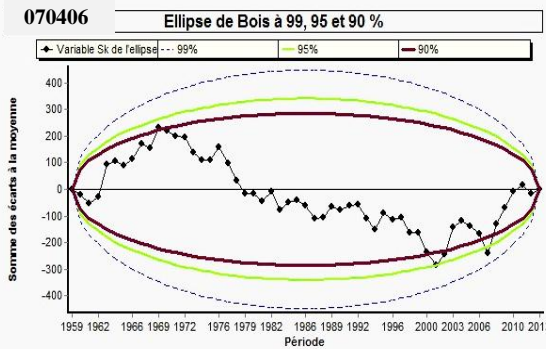
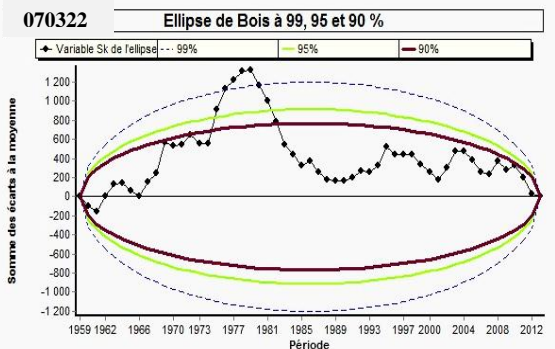
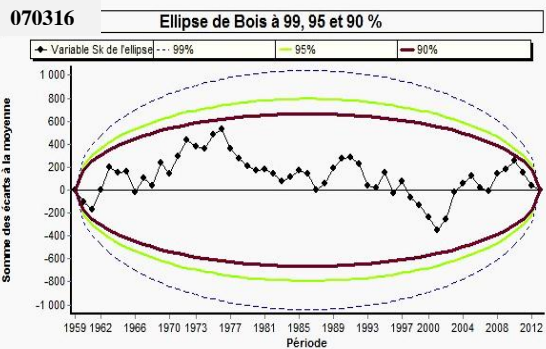
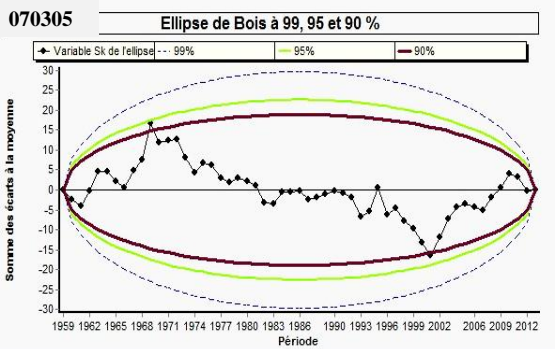
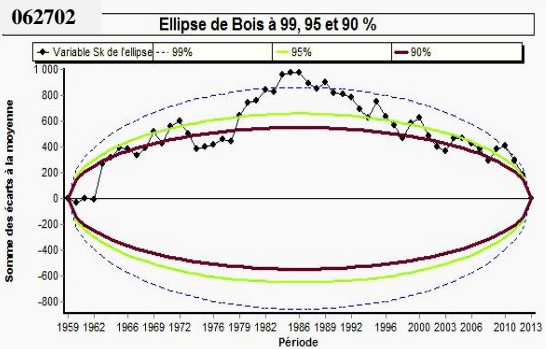
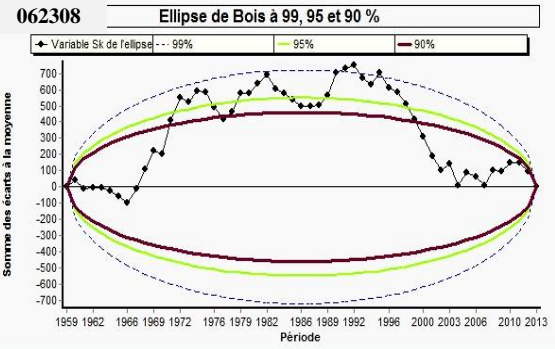
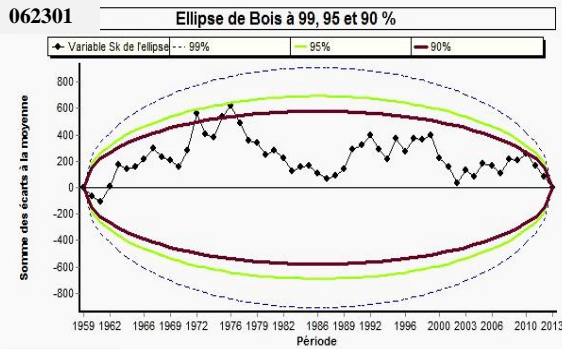
Détection de ruptures – logiciel Chronostat-

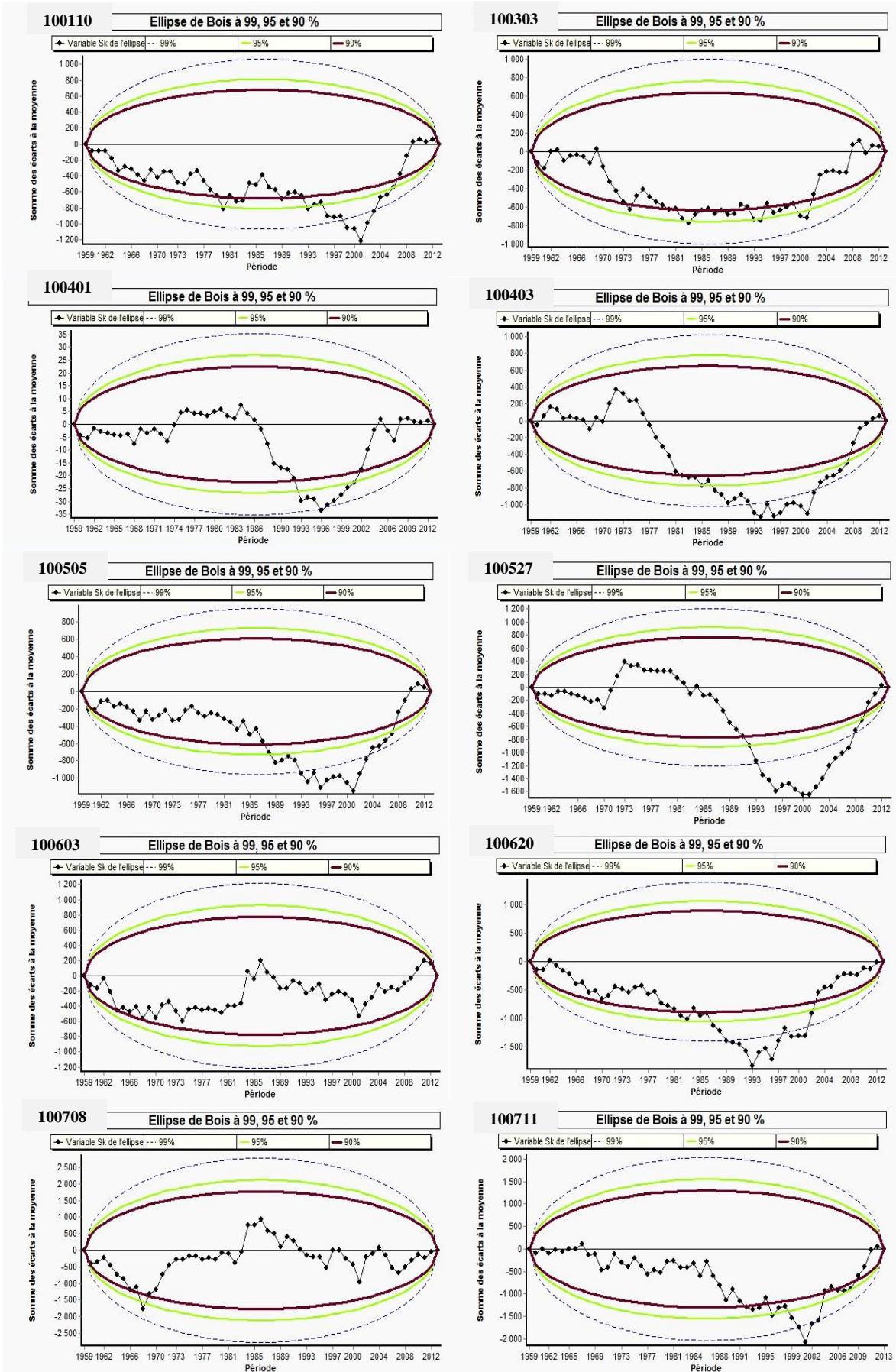


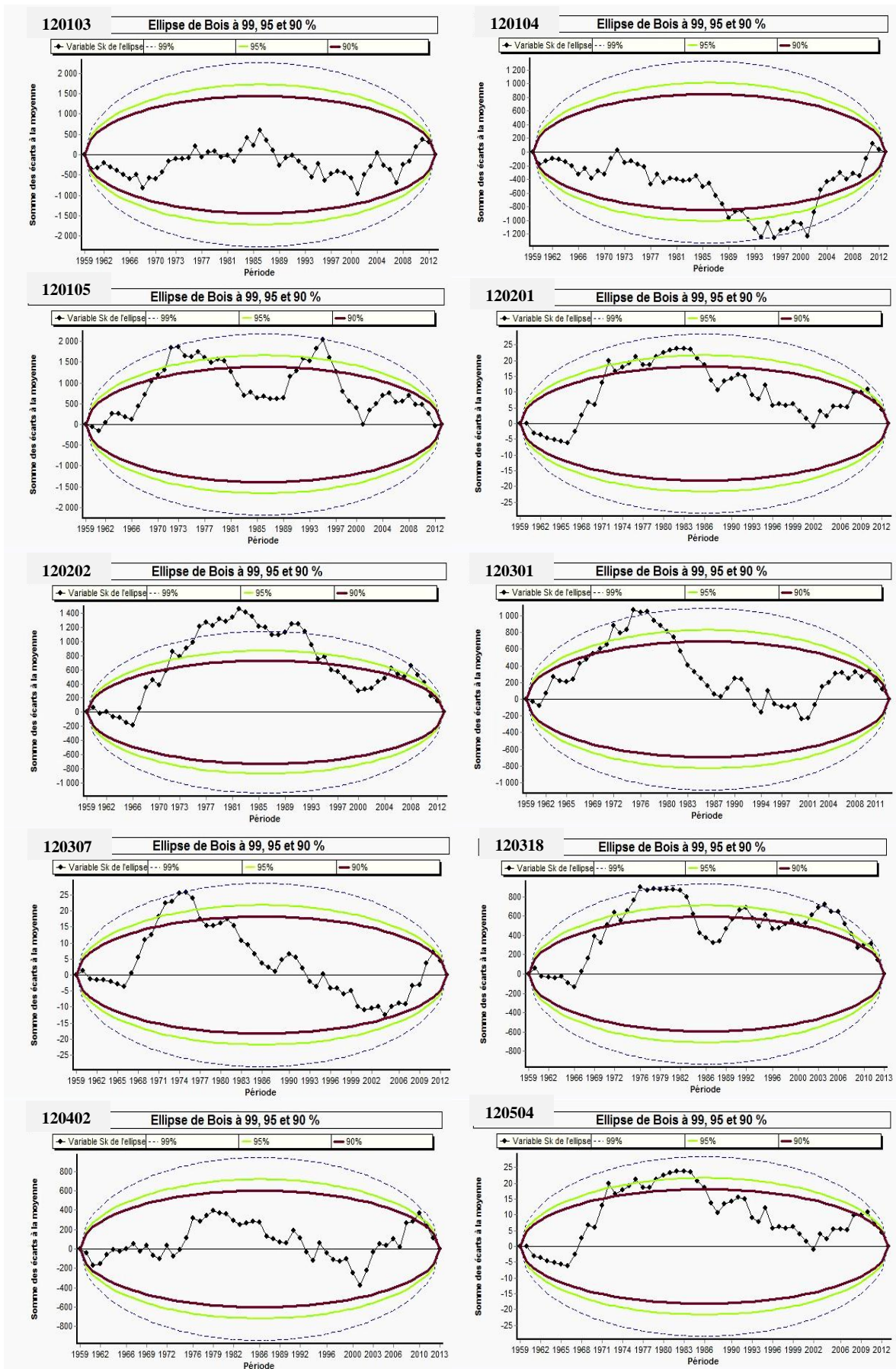
Détection de ruptures – logiciel Khronostat-

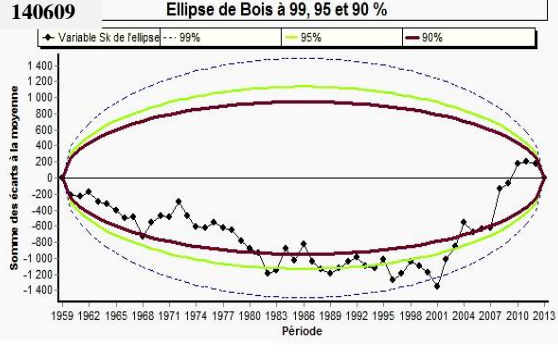
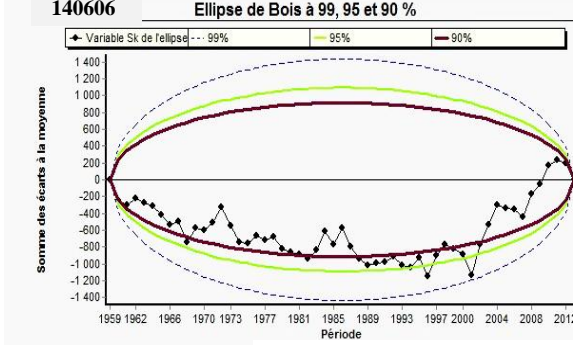
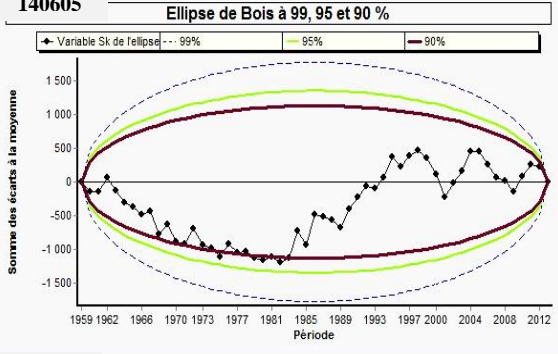
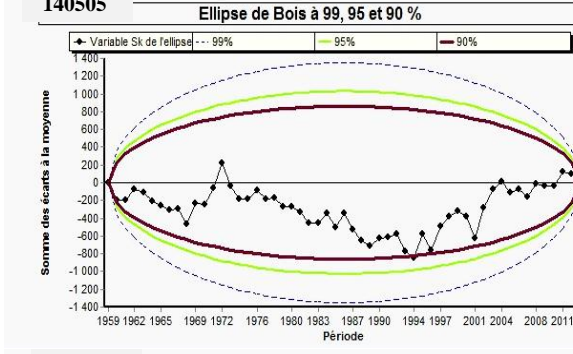
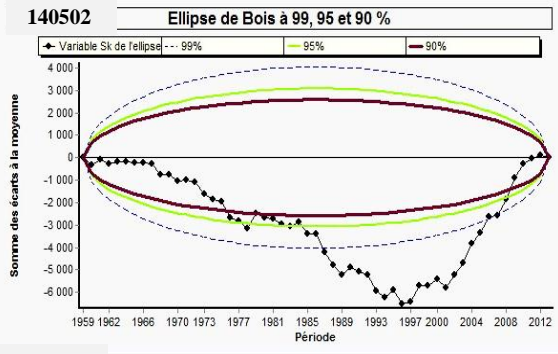
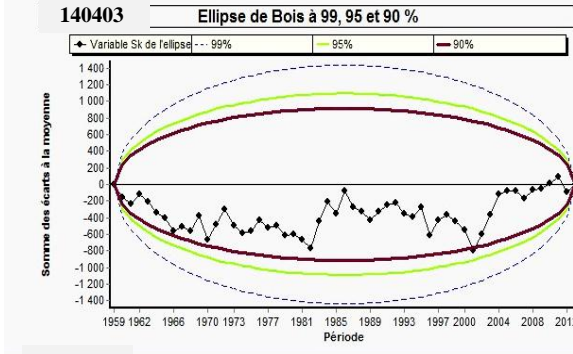
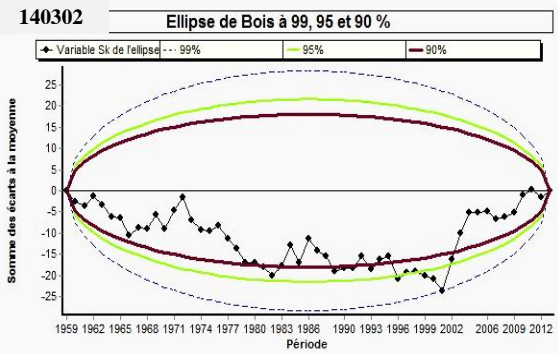
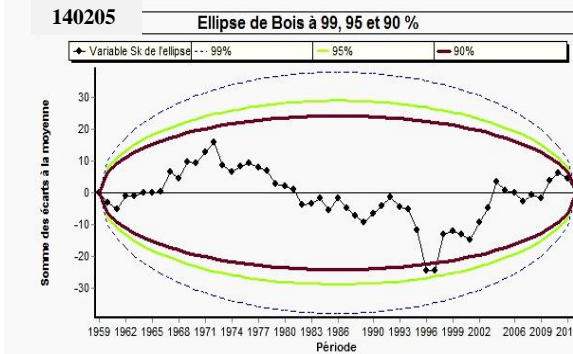
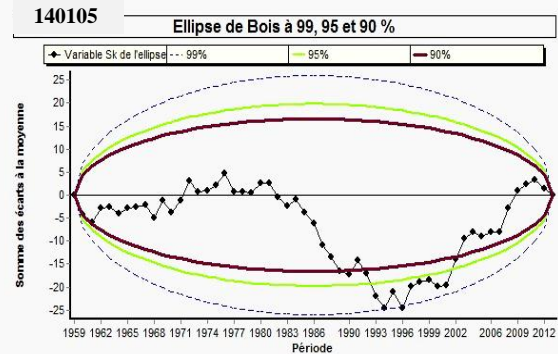
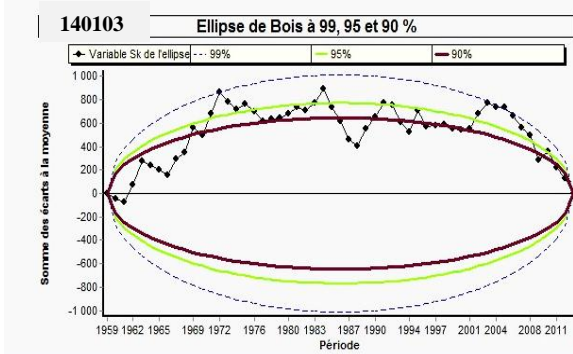


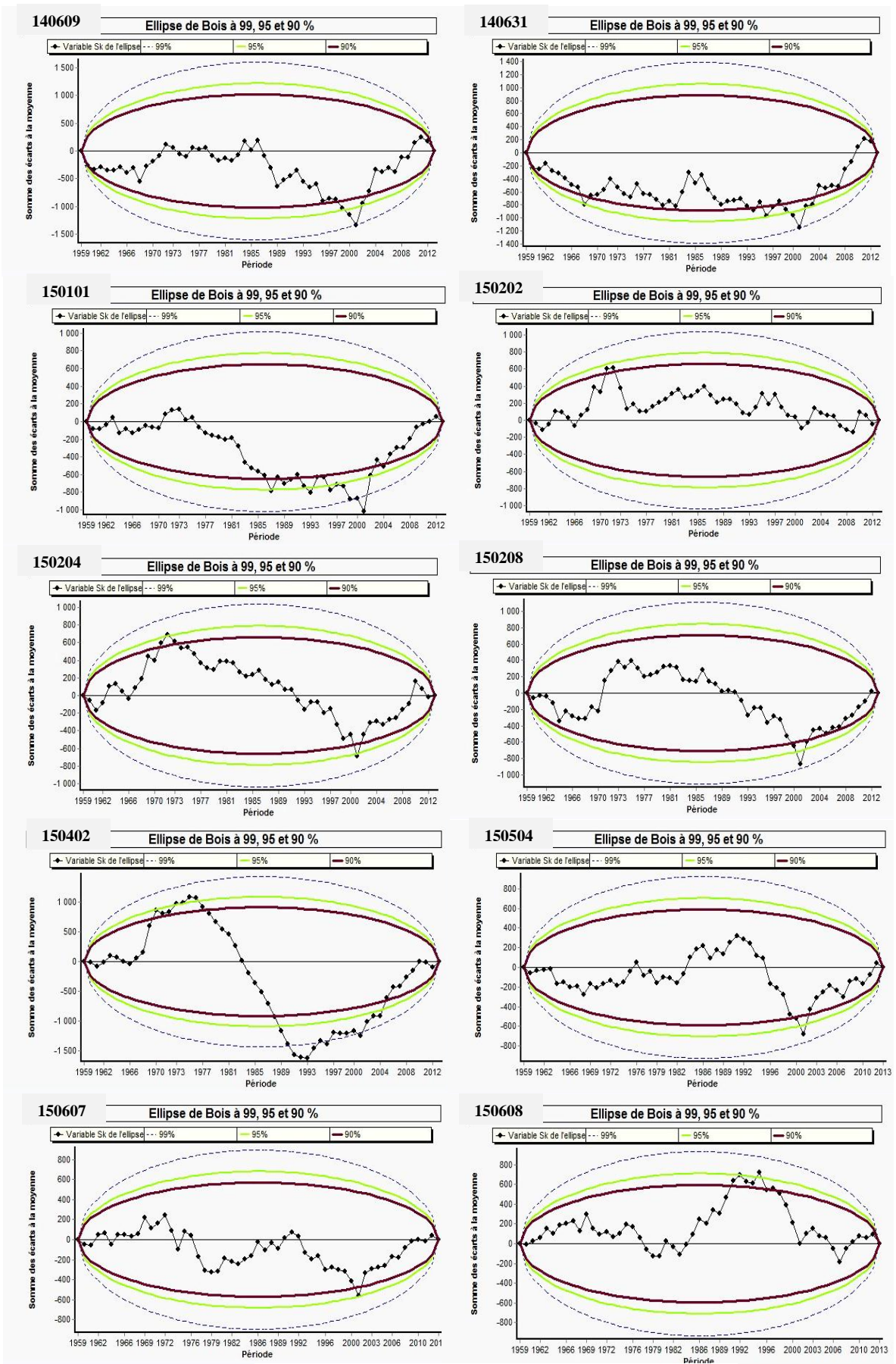
Détection de ruptures – logiciel Chronostat-

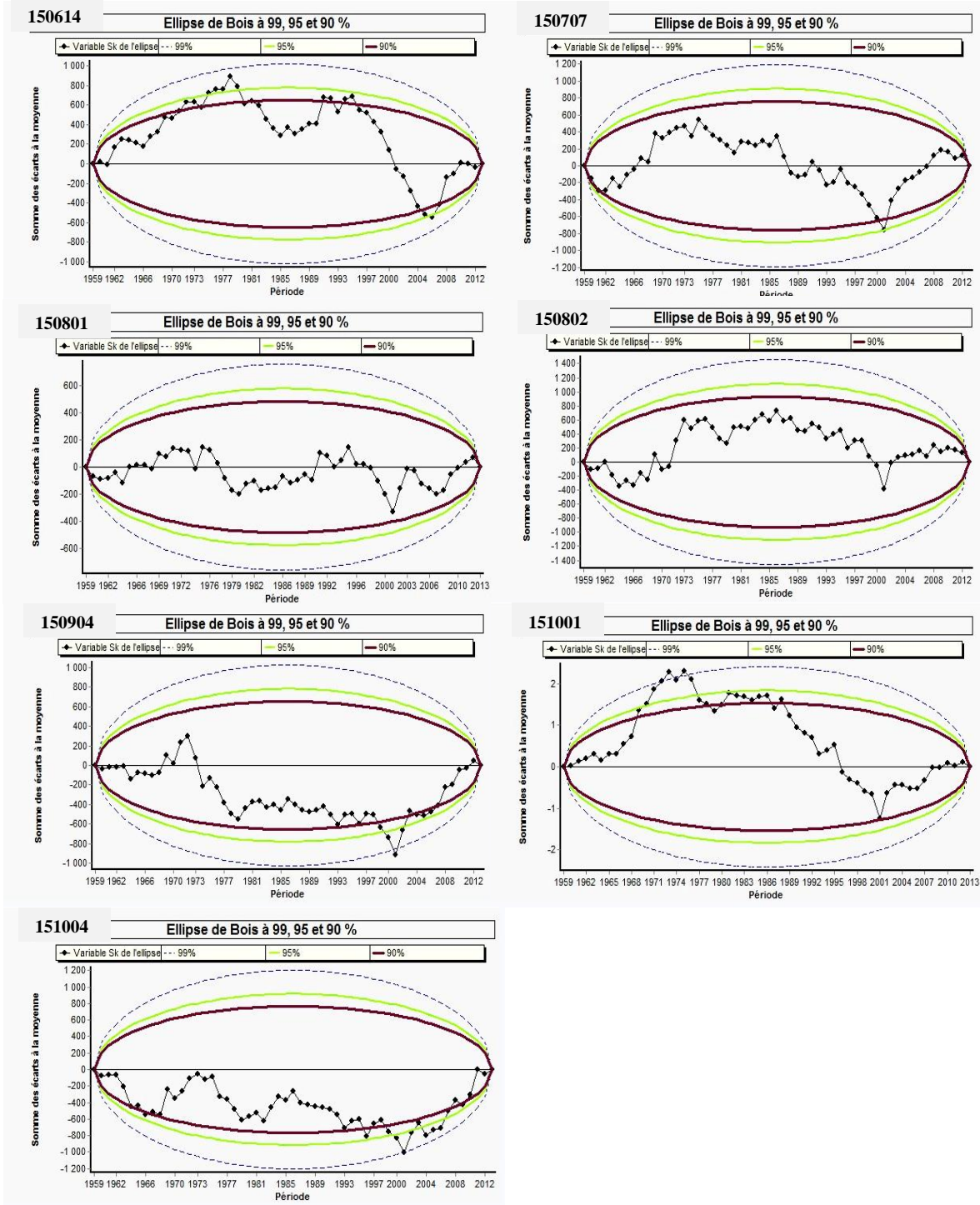












Détection de ruptures – logiciel Khronostat-