

École Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach Alger
Département : Génie rural
Section : Hydraulique agricole
Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques

analyse du régime climatique au nord de l'algérie

Présenté par :
Mlle Taibi Sabrina
Directrice de thèse : Mme. Souag D Maitre de conférences
03/03/2011

Jury Président: M. Aidaoui A Professeur Examineurs: M. Hartani T Professeur M. Sellam F Chargé de cours M. Medjerab A Maitre de conférences Invité : M. Demmak A Docteur

Table des matières

Remerciements . .	5
Dédicace . .	6
LISTES DES ABREVIATIONS . .	7
Résumé . .	8
ABSTRACT . .	9
صغلم . .	10
Introduction générale . .	11
PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE . .	13
Chapitre 1 : Évolution des précipitations et des températures . .	13
Introduction . .	13
1-1- Évolution des précipitations et des températures dans le monde selon le GIEC (GIEC, 2001 ; GIEC, 2007) . .	13
1-2- Évolution du Climat méditerranéen . .	16
Conclusion . .	21
Chapitre 2 : Indicateurs de variations ou de changements climatiques et leurs applications . .	21
Introduction . .	21
2-1- Tests d'homogénéité et de stationnarité . .	22
2-2- Indices pluviométriques . .	26
2-3- Travaux réalisés pour la détection d'un changement ou d'une variation climatique par les différentes méthodes statistiques . .	29
Conclusion . .	32
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES . .	34
Chapitre3 : Présentation de la zone d'étude et des données climatologiques . .	34
Introduction . .	34
3-1- Présentation de la zone d'étude . .	34
3-2- Données climatologiques utilisées . .	44
Conclusion . .	47
Chapitre 4 : Méthodes utilisées . .	47
Introduction . .	47
4.1 Tests de rupture . .	47
4-2- Indice pluviométrique standardisé . .	52
4-3- Chaines de Markov . .	52
4-4- Analyse en composantes principales . .	57
Conclusion . .	62
chapitre 5 : Critique des données et variabilité des précipitations . .	63
Introduction . .	63
5-1- Critique des données . .	63
5-2- Analyse de la variabilité de la pluviométrie . .	65
Conclusion . .	77
chapitre 6 : Analyse du régime pluviométrique par les tests de rupture . .	78

Introduction . . .	78
6-1- Résultats des tests de rupture à l'échelle annuelle . . .	79
6-2- Résultats des tests de rupture à l'échelle saisonnière . . .	86
Conclusion . . .	88
Chapitre 7 : Analyse du régime pluviométrique par l'indice pluviométrique standardisé . . .	88
Introduction . . .	88
7-1- Évolution de l'indice pluviométrique de certaines stations . . .	89
7-2- Variation de l'indice pluviométrique au Nord Algérien . . .	93
Conclusion . . .	96
chapitre 8 : Analyse des pluies journalières par les chaines de Markov . . .	97
Introduction . . .	97
8-1- Chaines de Markov pour la période d'étude 1936/1937-2008/2009 . . .	97
8-2- Chaines de Markov pour les trois périodes (1936-1975) (1976-2001) (2002-2008) . . .	99
Conclusion . . .	100
chapitre 9 : Analyse du régime pluviométrique par l'analyse en composantes principales . . .	101
Introduction . . .	101
9-1- Analyse en composantes principales à l'échelle annuelle . . .	101
9-2- Analyse en composantes principales à l'échelle saisonnière. . .	107
9-3- Analyse en composantes principales des trois périodes . . .	118
Conclusion . . .	123
chapitre 10 : Analyse des températures . . .	124
Introduction . . .	124
10-1- Analyse statistique des températures annuelles . . .	124
10-2- Analyse de la tendance des températures par les tests de rupture . . .	129
10-3- Détection d'une périodicité par l'analyse spectrale des températures . . .	135
10-4- Analyse en composantes principales . . .	136
Conclusion . . .	138
CONCLUSION GENERALE . . .	140
Références bibliographiques . . .	144
Annexe . . .	150
Annexe 01 :Caractéristiques statistiques de toutes les stations pluviométriques. . .	150
Annexe 02 : Probabilité de succession de deux années sèches. . .	150
Annexe 03 : Position du Maximum. . .	151
Annexe 04 :Résultats des tests de rupture à l'échelle annuelle. . .	152
Annexe 05 :Résultats des tests de rupture à l'échelle saisonnière. . .	153
Annexe 06 : Évolution de l'indice pluviométrique standardisé des stations de la zone d'étude. . .	154
Annexe 07 :Résultats des Chaines de Markov pour quatre saisons des trois périodes. . .	155

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Dieu tout puissant, car sans son aide et sa bienveillance, rien de cela n'aurait pu être possible.

Je tiens, à exprimer ma gratitude, à Mme SOUAG D., ma directrice de thèse, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils, et surtout pour son soutien tout le long de ma post-graduation.

Je remercie également, Mr. AIDAOUI A, pour avoir accepté de présider mon jury.

Je remercie aussi, Mr. HARTANI T, Mr. SELLAM F, et Mr. MEDJERAB A, pour avoir accepté d'examiner mon travail, et de faire partie de mon jury.

Je tiens à remercier Mr. DEMMAK A, pour sa présence honorable.

Je remercie le directeur général de l'ANRH, Mr. TAIBI R, et tout le personnel,

Je remercie aussi Mr BEHLOULI L, pour son aide et tout le département d'hydrologie.

Je remercie le responsable de la climatologie de l'ONM, Mr. BOUCHERF D.

Un grand merci à toute ma famille, pour son soutien et ses encouragements.

Dédicace

Je dédie ce travail : À mes très chers parents, qui m'ont aidée, encouragée, soutenue, et surtout aimée, À mes grands parents, À ma très chère sœur: Amel, À mes deux frères : Walid et Mohamed, À tous mes amis : Meriem, Meriem, Lotfi, Zakari, Radia, Zaki, Sofia, Imen et les juju, Rym, Amina, Asma, Mustapha, Meriem, Maçaab, Rafika, Amel, Sonia À toute ma promotion de la post-graduation : Mokrane, Nour El Houda, Lynda, Sakher, Amina Aicha, Ismail, Khaled À tous les étudiants et à tout le personnel du Génie-Rural Et enfin à toute personne qui reconnaitra son empreinte dans ce modeste travail.

LISTES DES ABREVIATIONS

- ACP : Analyse en Composantes Principales
- ACPR : Analyse en Composantes Principales avec Rotation
- ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
- CP : Composante Principale
- CPR : Composante Principale avec Rotation
- GIEC : Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat
- NAO : North Atlantic Oscillation (Oscillation nord atlantique)
- ONM : Office National de Météorologie
- P : pluie
- SDAS : Succession de Deux Années Sèches
- SPI : Standardized Precipitation Index (Indice pluviométrique standardisé)
- T°C : Température

Résumé

Une analyse du régime climatique du Nord de l'Algérie, à travers les deux paramètres du climat : précipitation et température, a été établie sur une période de soixante treize ans (1936-2008), en utilisant les méthodes graphiques, les tests statistiques, l'indice pluviométrique standardisé et l'analyse en composantes principales. Une baisse des précipitations est observée à partir de la moitié des années 70 surtout à l'Ouest (déficit pluviométrique entre 13 et 30%). Les décennies 80 et 90 sont les plus déficitaires.

L'analyse en composantes principales a mis en évidence cinq grandes régions. La région centre littorale, caractérisée par une légère baisse des précipitations annuelles à partir de la moitié des années 70. La région Est littorale, caractérisée par une stabilité du régime pluviométrique. La région Ouest littorale : caractérisée par un déficit pluviométrique annuel important à partir de 1976. La région des hauts plateaux Est : caractérisée par une stabilité du régime. La région des hauts plateaux Ouest et centre : caractérisée par les déficits pluviométriques les plus importants de la zone d'étude.

Les températures ont connu une augmentation de plus de 0,5°C à partir des années 80. La décennie 1992-2002 est la plus chaude (environ 0,7°C). La tendance à la baisse des précipitations et l'augmentation des températures s'explique principalement par la phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique. Depuis 2002, une augmentation des précipitations et une stabilité des températures sont observées. L'année 2008 pourrait être le début d'une période de refroidissement.

Mots clés : Précipitations, Température, Méthodes statistiques, Tendances, Oscillation Nord Atlantique

ABSTRACT

An analysis of the climate regime of northern Algeria, through the two climatic parameters: precipitation and temperature, was established over a period of seventy three years (1936-2008), using graphical methods, statistical tests, the standardized precipitation index and principal component analysis. A decrease in rainfall is observed from the mid 70 mostly Western (rainfall deficit between 13 and 30%).Decades 80 and 90 are the largest deficits. The principal component analysis revealed five major regions.

The central coastal region, characterized by a slight decrease in annual rainfall from the mid 70's. The eastern coastal region, characterized by stability of rainfall. The western coastal region: characterized by a significant annual rainfall deficit from 1976. The Eastern Highlands: characterized by a stable regime. The highlands west and center: characterized by rainfall deficits most important area of study.

Temperatures have risen more than 0.5°C from the 80's. The decade 1992-2002 is the warmest (about 0.7°C). The downward trend in rainfall and higher temperatures is mainly due to the positive phase of the North Atlantic Oscillation. Since 2002, an increase in precipitation and temperature stability are observed. The year 2008 could be the beginning of a period of cooling.

Keywords: Precipitation, Temperature, Statistical Methods, Trends, North Atlantic Oscillation

ص خ لم

يتناول هذا البحث تحليلا لمناخ شمال الجزائر ، من خلال متغيرين مناخيين: الأمطار و درجة الحرارة على مدى 73 سنة (1936-2008) ،و ذلك عن طريق استخدام الأساليب البيانية ، الاختبارات الإحصائية، مؤشر موحد هطول الأمطار و تحليل المكونات الرئيسية. إذ لوحظ وجود انخفاض في سقوط الأمطار ابتداء من منتصف السبعينيات خاصة في الناحية الغربية لمنطقة البحث (تتراوح نسبة العجز من 13 إلى 30 بالمئة) خاصة في سنوات الثمانينيات و التسعينيات. لقد كثف تحليل المكونات الرئيسية عن خمس مناطق رئيسية: المنطقة الساحلية الوسطى ، و التي تتميز بانخفاض طفيف في معدل تساقط الأمطار السنوي ابتداء من منتصف السبعينيات. المنطقة الشرقية الساحلية و تتميز باستقرار في نظم تساقط الأمطار. المنطقة الغربية الساحلية المعروفة بعجز سنوي كبير في هطول الأمطار منذ عام 1976. منطقة الهضاب العليا الشرقية المتميزة باستقرار في نظام تساقط الأمطار. وأخيرا منطقة الهضاب العليا الغربية و الوسطى التي تعرضت لأكبر عجز في هطول الأمطار في شمال الجزائر. أما بالنسبة لدرجات الحرارة فقد ارتفعت بـ 0,5 درجة مئوية ابتداء من الثمانينيات لتصل إلى 0,7 درجة في الفترة ما بين 1992-2002. إن سقوط الأمطار و ارتفاع درجات الحرارة راجع إلى المرحلة الإيجابية لتذبذب شمال الأطلسي. فيحين لوحظ هناك تزايد في هطول الأمطار واستقرار في درجات الحرارة منذ سنة 2002. و من المقرر أن يكون عام 2008 هو بداية لمرحلة مناخية باردة.

الكلمات المفتاحية: الأمطار، الحرارة ، الأساليب الإحصائية ، الاتجاهات ، تذبذب شمال المحيط الأطلسي

Introduction générale

Durant cette dernière décennie, la communauté internationale est de plus en plus préoccupée par l'évolution du climat et ses conséquences socio-économiques et environnementales. Depuis le milieu du 20^{ème} siècle une tendance à la diminution des précipitations et une augmentation de la température, qui se poursuivent en ce début du 21^{ème} siècle, sont mises en évidence par plusieurs études (Matari et al., 2007 ; GIEC, 2007 ; Xoplaki E., 2004 ; Amraoui L, 2009...etc.).

En Afrique du Nord, Le Maghreb est soumis au climat de type méditerranéen où dominant les étages bioclimatiques semi aride, aride et hyperaride. Les données climatiques relevées dans la région durant le 20^{ème} siècle indiquent un réchauffement durant ce siècle estimé à plus de 1°C avec une tendance accentuée pour les 30 dernières années et une baisse de la pluviométrie depuis la moitié des années 1970 (Djelloui Y., 2007). Le Sahel ouest africain subit, lui aussi, un déficit pluviométrique sans précédent, depuis 1970, et la période 1976-1993 est la plus longue et la plus intense du siècle (Hôte Y., 2003).

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les habitants et les écosystèmes. Les zones arides sont particulièrement touchées par les sécheresses récurrentes et prolongées et la question de l'eau représente un véritable enjeu au cours de ce siècle.

Selon Demmak et al. (2001), l'Algérie a connu au cours des 25 dernières années (1975-1998), une sécheresse intense et persistante. Le déficit pluviométrique déterminé pour 16 postes représentatifs des régions Ouest, Centre et Est met en évidence un déficit de 26% à l'Ouest, 16% au centre et 11% à l'Est. Il apparaît donc que la sécheresse a touché l'ensemble du territoire, et a sévit particulièrement dans les régions Ouest du pays.

S'agit-il d'un phénomène naturel lié à des fluctuations cycliques ou à un changement climatique irréversible ?

Depuis, plusieurs études ont été entamées à cet égard. L'analyse des précipitations et des températures sur de longues séries est devenue la préoccupation de plusieurs institutions et chercheurs scientifiques. Le bassin méditerranéen à été sujet de travaux très intéressants essentiellement sur la variabilité interannuelle des précipitations ainsi que sa relation avec la circulation atmosphérique générale.

En Algérie, les travaux réalisés s'intéressent le plus souvent au suivi des précipitations annuelles surtout dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. L'analyse des températures n'a pas connu un grand nombre de recherches.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour caractériser le régime climatique. L'analyse en composantes principales est une des méthodes classiques mais souvent efficace dans l'analyse spatio-temporelle des précipitations en Algérie. Des tests statistiques sont aussi utilisés pour démontrer la stationnarité d'une série de données chronologiques (pluie, température). Par exemple, le test de Pettitt qui a été très utilisé dans l'analyse des séries pluviométriques, dans plusieurs pays du monde et qui a bien prouvé son efficacité. Les travaux effectués au cours de ces dernières années montrent un grand intérêt à un nouvel

indice appelé « l'indice pluviométrique standardisé ». Cet indice permet de caractériser le degré de sévérité des périodes sèches et humides d'une région donnée, à plusieurs échelles de temps.

Suite aux différents travaux consacrés à l'étude du régime climatique en Algérie. Notre travail de recherche vient compléter les résultats et conclusions déjà aboutis précédemment. Une question pertinente sera traitée au cours de ce travail :

- Quelle est l'évolution des précipitations et des températures au Nord de l'Algérie au cours de la période 1936-1937/2008-2009?

Cette question sous entend en premier lieu ; l'analyse temporelle et spatiale des précipitations et des températures, et en deuxième lieu ; l'identification des principaux facteurs liés à cette évolution.

Pour ce faire, nous faisons appel aux méthodes les plus utilisées dans l'analyse du régime climatique telles que: les méthodes graphiques, les tests statistiques, les chaînes de Markov et l'analyse en composantes principales.

Nous divisons notre travail en trois grandes parties :

- **La première partie**, aura pour objet principal d'impliquer le lecteur de ce document dans le sujet, à travers une étude bibliographique, sur l'évolution du climat et les différents changements observés à l'échelle du globe; une présentation des différents tests et méthodes utilisés dans la détermination du régime climatique et leurs applications.
- **La deuxième partie**, exposera dans les détails, d'une part, toute la zone d'étude et ses caractéristiques; et d'autre part, la méthodologie adoptée pour l'analyse des deux paramètres climatiques pluie et température.
- **La troisième partie**, mettra en valeur la discussion et l'analyse des résultats concernant l'évolution des précipitations et des températures au cours de ces 73 dernières années.

PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Évolution des précipitations et des températures

Introduction

Le climat n'a cessé de fluctuer à toutes les échelles de temps. Cependant les variations qu'a connu le climat à l'échelle du globe ces dernières années semblent préoccuper plusieurs chercheurs en particulier ceux du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Nous exposons dans ce chapitre les variations climatiques observées à l'échelle planétaire ainsi qu'à l'échelle régionale, nous prendrons comme exemple le climat méditerranéen, puisque notre zone d'étude (est soumise à ce type de climat) appartient à la région méditerranéenne.

1-1- Évolution des précipitations et des températures dans le monde selon le GIEC (GIEC, 2001 ; GIEC, 2007)

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Ce groupe d'experts est composé d'une centaine de scientifiques issus de toutes les régions du monde.

Depuis 1990, le GIEC a présenté une série de rapports d'évaluation, rapports spéciaux, notes techniques, méthodologies et autres documents devenus des ouvrages de référence largement utilisés par les gouvernants, les scientifiques et d'autres experts.

Jusqu'à maintenant, le GIEC a présenté quatre rapports concernant les changements climatiques, à savoir le rapport 1 en 1992, le rapport 2 en 1995, le rapport 3 en 2001 et le rapport 4 en 2007.

Chaque nouveau rapport apporte soit une confirmation soit un complément de ce qui a été déjà fait ou observé auparavant.

1-1-1- Changements observés du système climatique

Grâce au nombre croissant de mesures directes une série de changements climatiques sont maintenant bien documentés. Les indicateurs de température et les indicateurs hydrologiques contribuent au degré de certitude de ces changements.

a La température

La température moyenne à la surface du globe a augmenté de $0,6 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ °C}$ depuis la fin du 20^{ème} siècle. Les années 90 ont été la décennie la plus chaude et 1998 l'année

la plus chaude jamais enregistrée. La période (1995–2006) figure parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe. La majeure partie de la hausse de la température mondiale observée durant le 20^{ème} siècle s'est produite pendant deux périodes distinctes : de 1910 à 1945, et depuis 1976. Quant au rythme de cette hausse, il s'est établi à 0,15 °C environ par décennie pendant ces deux périodes.

Les analyses de l'évolution des températures depuis 1958 pour les huit premiers kilomètres de l'atmosphère et à la surface sont assez concordantes et indiquent un réchauffement d'environ 0,1 °C par décennie. Par contre, depuis l'apparition des relevés de satellite en 1979, les températures transmises tant par satellite que par ballon météorologique indiquent un réchauffement de la troposphère d'environ 0,10±0,05°C par décennie.

Quant à la température moyenne à la surface du globe, elle a augmenté de façon notable, à raison de 0,15±0,05°C par décennie. Par contre, durant la période 1958-1978, l'élévation de la température à la surface était presque nulle, alors qu'elle s'établissait à près de 0,2 °C par décennie pour les huit premiers kilomètres de l'atmosphère. Cette différence de température est due principalement aux fluctuations du rythme du réchauffement dans les régions tropicales et subtropicales, qui a été particulièrement rapide dans les huit premiers kilomètres de l'atmosphère avant 1979, mais qui a ralenti depuis.

Il n'y a pas de variations notables du taux de réchauffement au-dessus des régions continentales de latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Dans la haute troposphère, aucune évolution appréciable de température à l'échelle du globe n'a été détectée depuis le début des années 60. Pour ce qui est de la stratosphère, les observations par satellite aussi bien que par ballon mettent en évidence un refroidissement important, ponctué d'épisodes de brusque réchauffement d'une durée d'un an ou deux, causés par des éruptions volcaniques.

Le nouveau relevé détaillé des températures dans l'hémisphère Nord montre, après reconstitution des années 1000 à 1980 qu'une période relativement chaude, allant du 11^{ème} au 14^{ème} siècle, a précédé une période relativement froide, allant du 15^{ème} au 19^{ème} siècle. Par contre, ces données ne confirment pas la synchronicité à l'échelle planétaire de ces périodes connues respectivement sous les noms de «période de réchauffement médiéval» et «petit âge glaciaire». Le réchauffement de l'hémisphère Nord au 20^{ème} siècle, tant par son ampleur que par sa durée, semble avoir été sans précédent depuis mille ans et ne peut donc être considéré comme un simple retour à la normale après le «petit âge glaciaire». Ces analyses sont confirmées par l'analyse de sensibilité de la représentativité spatiale des données paléo-climatiques disponibles, qui indiquent que le réchauffement observé ces dix dernières années outrepassé l'intervalle de confiance de 95 % lié à l'incertitude en matière de température, même pour les périodes les plus chaudes du dernier millénaire. Par ailleurs, plusieurs analyses récentes semblent montrer que les températures observées dans l'hémisphère Nord durant la dernière décennie ont été les plus élevées des six à dix derniers siècles.

b Les précipitations et l'humidité atmosphérique

Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles

diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud. Il apparaît que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970.

Les journées froides, les nuits froides et le gel ont été moins fréquents sur la plus grande partie des terres émergées depuis cinquante ans et que le nombre de journées chaudes et de nuits chaudes a au contraire augmenté : vagues de chaleur sur la majeure partie des terres émergées, fortes précipitations dans la plupart des régions et, depuis 1975, élévations extrêmes du niveau de la mer dans le monde entier.

La hauteur annuelle de précipitation pour les terres émergées a continué d'augmenter aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord (très probablement à un rythme de 0,5 à 1 % par décennie), sauf en Asie orientale. Dans les zones subtropicales (de 10° à 30° de latitude nord), les pluies à la surface des terres émergées ont en moyenne diminué (probablement d'environ 0,3% par décennie), bien qu'on ait noté des signes d'inversion de cette tendance ces dernières années.

Les mesures de la hauteur de précipitation à la surface du sol en zone tropicale indiquent une augmentation probable d'environ 0,2 à 0,3 % par décennie au 20^{ème} siècle. Les mesures directes de la hauteur de précipitation et de nouvelles analyses par modèle des précipitations présumées mettent en évidence une augmentation correspondante des pluies sur de grandes parties des océans tropicaux. Il existe une forte corrélation entre l'augmentation des précipitations sur les terres émergées aux latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord et l'augmentation à long terme de la nébulosité totale. Contrairement à ce qui a été observé dans l'hémisphère Nord, aucune variation systématique comparable de la hauteur de précipitation moyenne selon la latitude n'a été détectée dans l'hémisphère Sud.

Il est probable que la quantité totale de vapeur d'eau atmosphérique a augmenté de plusieurs points de pourcentage par décennie dans de nombreuses régions de l'hémisphère Nord. Les variations de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère durant les quelques 25 dernières années ont fait l'objet, dans certaines régions, d'analyses fondées sur des observations en surface in situ ainsi que sur des mesures concernant la basse troposphère effectuées par satellite et ballon météorologique. Malgré l'existence probable de biais en fonction du temps et de variations régionales des tendances, les séries de données les plus fiables semblent indiquer une augmentation générale de la teneur en vapeur d'eau atmosphérique à la surface du globe et dans la basse troposphère au cours des dernières décennies. De même, la concentration de vapeur d'eau dans la basse stratosphère a probablement augmenté de quelque 10 % par décennie depuis le début des observations (1980).

1-1-2- Conclusions robustes et incertitudes clés concernant les changements climatiques, leurs effets et leurs causes

Dans son dernier rapport (2007), le GIEC a défini certaines conclusions ainsi que les incertitudes liées aux changements climatiques observés et les projections sur l'évolution future du climat. On entend par conclusion robuste en matière de changements climatiques toute conclusion qui reste valable pour un large éventail de démarches, de méthodes, de modèles et d'hypothèses et qui devrait généralement le rester malgré les incertitudes. Quant aux incertitudes clés, ce sont des incertitudes qui, une fois levées, peuvent donner lieu à de nouvelles conclusions robustes.

Conclusions

L'essentiel du réchauffement général moyen constaté depuis 50 ans est pratiquement attribuable à l'augmentation de concentration des gaz à effet de serre anthropiques, qui ont connu une hausse de 70% entre 1970 et 2004. Il est en outre probable qu'en moyenne, tous les continents, à l'exception de l'Antarctique, ont subi les effets d'un réchauffement anthropique marqué. Ce réchauffement anthropique survenu depuis 30 ans a joué un rôle notable à l'échelle du globe dans l'évolution observée de nombreux systèmes physiques et biologiques.

· Incertitudes

Les données relatives au climat restent insuffisantes dans certaines régions. Les données et les études concernant les changements observés dans les systèmes naturels et aménagés sont très inégalement réparties d'une région à l'autre et sont particulièrement peu abondantes dans les pays en développement.

La variabilité des phénomènes extrêmes, comme la sécheresse, les cyclones tropicaux, les températures extrêmes ou la fréquence et l'intensité des précipitations, est plus difficile à analyser et à surveiller que les moyennes climatiques, car cela nécessite de longues séries chronologiques de données à haute résolution spatiale et temporelle.

1-2- Évolution du Climat méditerranéen

Le climat méditerranéen, transition entre le climat aride des régions du Nord de l'Afrique et le climat tempéré des régions d'Europe se distingue essentiellement par des étés chauds et secs et une forte irrégularité des pluies.

Une pluviométrie annuelle, comprise entre 600 mm et 1000 mm pour les pays du Nord et proche de 400 mm pour certains pays du Sud, et une évapotranspiration potentielle annuelle, souvent supérieure à 1200 mm, impliquent un déficit hydrique souvent important.

Si l'on excepte le haut bassin du Nil, les bassins versants drainés par la Méditerranée représentent globalement environ 1,9 million de km². Ils dépassent rarement 10 000 km².

Les régimes hydrologiques sont très irréguliers marqués par une forte irrégularité inter-saisonnière.

La ressource mobilisable en eau douce est souvent difficile d'accès, fragile et mal répartie. Il en naît, d'une part, des conflits d'intérêt, et, d'autre part, des difficultés à préserver durablement leur environnement. De ce fait, les pays du bassin Méditerranéen connaissent des situations très contrastées selon la disponibilité de leurs ressources en eau et selon l'ampleur de leurs besoins, fortement accrus par l'irrigation, par le développement du tourisme et par l'amélioration des modes de vie.

Concernant le partage de la ressource entre les différents utilisateurs d'une même région, on constate que c'est en saison sèche, caractérisée par une diminution des ressources en eau atmosphérique, de surface et souterraine, qu'augmentent simultanément les demandes en eau agricole et touristique. Au cours de ces périodes, la faiblesse voire l'absence d'écoulement, amplifie les impacts des déversements d'eau usée et de polluants divers, ce qui tend à diminuer encore les ressources mobilisables.

La place réservée à l'**irrigation** est liée à la volonté des pays d'atteindre un niveau d'autosuffisance alimentaire. Le recours à une irrigation de complément devient alors indispensable dans un contexte climatique caractérisé par une forte variabilité temporelle et notamment par des sécheresses prolongées. Ainsi, si au niveau mondial, on estime que

70 % des ressources en eau sont mobilisées pour l'irrigation, le ratio de certains pays du Sud et de l'Est du bassin Méditerranéen atteint déjà 90 %.

L'indice d'exploitation, rapport du volume d'eau prélevée au volume d'eau renouvelable en année moyenne est un indicateur de la pression exercée sur les ressources en eau mobilisables. Un indice d'exploitation dépassant 20 % est considéré comme révélateur de tensions déjà fortes. Un indice supérieur à 50% rend nécessaire et urgente une gestion volontariste et rigoureuse. A cet égard, les pays du bassin méditerranéen se caractérisent par des écarts extrêmement importants de cet indice. Il varie de quelques pourcents pour les pays du Nord à près de 100 % pour Israël et la Lybie. Il dépasse 20% dans les 2/3 des pays.

Le graphique ci-joint présente la valeur de l'indice d'exploitation exprimé en pourcent pour les pays du pourtour de la Méditerranée.

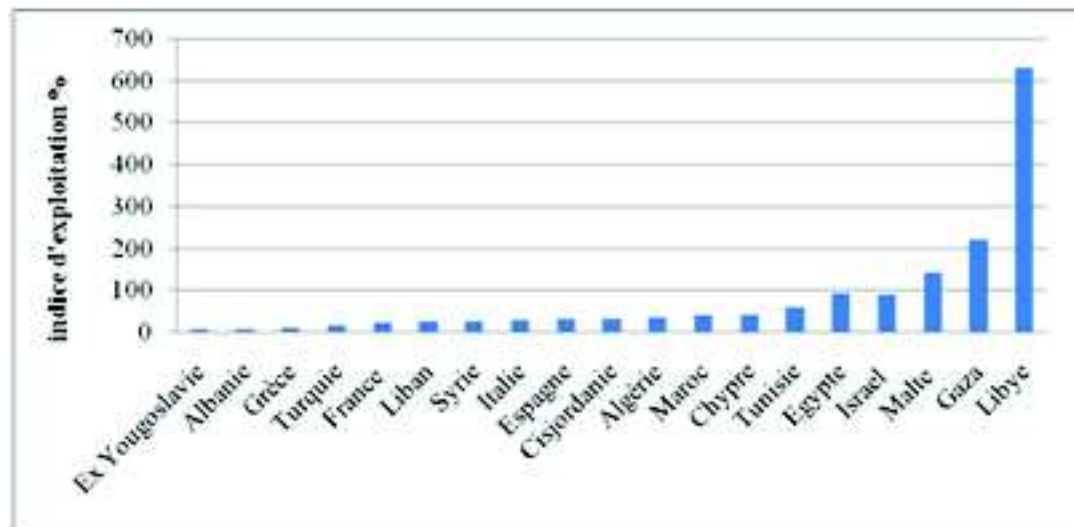


Figure 01 : Indice d'exploitation de différents pays méditerranéen (Morell M., 1998).

Ce graphique montre que cinq pays, ou territoires, ont un indice qui approche ou dépasse largement 100 % : Égypte, Israël, Malte, Gaza, et Libye. Cela traduit le recours à des ressources non renouvelables, à des techniques de désalinisation et/ou la réutilisation d'eaux usées. Les problèmes et les tensions actuelles, ou à venir, dépendent de l'évolution de la quantité d'eau disponible par habitant. 2000 m³/an/habitant est le seuil en dessous duquel se développent des situations préoccupantes. L'état de pénurie absolue se situe en dessous de 1000 m³/an/habitant. Or, plusieurs pays du Sud se trouvent déjà dans cette dernière catégorie, tels que Malte, la Libye, Israël, la Tunisie et l'Algérie. Chypre, le Liban, la Syrie, l'Égypte et le Maroc les rejoindraient en 2025 (Morell M., 1998). One of the most critical aspects of the Mediterranean

1-2-1- Tendances des précipitations et des températures dans la région Méditerranéenne

L'un des aspects les plus critiques de la région Méditerranéenne region is the hydrologic cycle and its variability in est le cycle hydrologique et sa variabilité relation to global climate variations and climate change. par rapport aux variations planétaires du climat. The topography of the Mediterranean basin is com-La topographie du bassin méditerranéen est complex with thermal and orographic forcing influencing thplexe, avec un forçage thermique et orographique influençant la structure des systèmes météorologiques et les circulations

régionale (Fernández et al. 2003). The Mediterranean is The balance between precipitation and evaporation. L'équilibre entre les précipitations et l'évaporation influence la circulation and the quality of the waters in the Mediterranean Sea (eg Mariotti and Struglia 2002). la mer Méditerranée.

The variability of the Mediterranean wet season (La variabilité des précipitations des saisons humides de la région Méditerranéenne) influences the hydrological budget of the area and has an essential role in the management of regional agriculture, water resources, ecosystems, environment, economics as well as social development and behaviour. (influence sur le bilan hydrologique de la zone et joue un rôle essentiel dans la gestion régionale de l'agriculture, les ressources en eau, les écosystèmes, l'environnement, l'économie ainsi que le développement social).

Many regional stations (L'analyse des tendances des précipitations pour la période 1950 à 1999, révèle que les précipitations de la saison humide ont augmenté en Méditerranée depuis le milieu du 20^{ème} siècle avec un maximum enregistré dans les années 1960 puis ont diminué dès lors. À l'exception de quelques périodes humides survenues dans les années soixante dix, début des années quatre vingt et fin des années quatre vingt dix, la seconde moitié du 20^{ème} siècle montre une tendance générale à la baisse de 2,2 mm/mois/décade. En particulier, la période fin quatre vingt-début quatre vingt dix, qui a connu une sécheresse générale sur de larges parties de la Méditerranée (Xoplaki E. et al, 2000).

Xoplaki et al (2004) ont constaté que les plus grandes quantités de précipitations durant la saison humide de la Méditerranée sont observées au mois d'Octobre à Mars mais avec de fortes variabilités. Despite the large spatio-temporal variability of precipitation trends can further be associated with shifts in general atmospheric circulation features such as jet streams, storm tracks, and monsoon circulations or with changes in the thermodynamic structure of the atmosphere (eg Eshel and Xoplaki E., 2004).

L'analyse de la variabilité saisonnière des précipitations et son évolution tout au long de la Méditerranée sur la période 1901-1998 indique une tendance négative de précipitations trends for winter in agreement with the findings of the IPCC (Folland et al. 2001). GIEC (Jacobeit (2000) et Giorgi (2002) in Xoplaki E., 2004).

L'analyse des températures au sud de la Méditerranée par Aesawy A.M. et al (1998) met en évidence un changement brutal pour les stations de Marrakech, Alger, Tripoli, Alexandrie, Amman et Beyrouth. Une tendance à l'augmentation est observée en 1922 et 1976 à Marrakech, en 1865 et 1967 à Alger et en 1910 à Beyrouth. Alors qu'à Alexandrie et Amman ce changement se traduit par une baisse de la température (refroidissement) et ceux respectivement en 1962 et 1965. Pour toutes les saisons, la plupart des stations indiquent un changement brutal au sein des séries de températures. L'étude de la persistance montre que cette persistance est significative à Marrakech, Alger et Tripoli.

Le Grand Maghreb situé au sud du bassin méditerranéen a connu des variations pluviométriques importantes. Au Maroc, les études réalisées par la direction de météorologie nationale (Benassi M., 2001), ont mis en évidence les changements que le climat du pays a connu durant les dernières décennies, notamment le phénomène de la sécheresse. La période trentenaire 1971-2000 a enregistré une diminution de la pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 15%. Depuis 1961, 1982-1983, 1983-1984 et 1994-1995 ont été les années hydrologiques de sécheresses les plus sévères que le Maroc ait connus. En outre, le régime pluviométrique interannuel a connu une tendance à la baisse avec une légère augmentation des pluies en début de la saison et un déclin de celles du reste des saisons surtout le printemps.

En Mauritanie, l'analyse de la pluviométrie depuis plus de cinquante ans (1942-2005) a révélé d'une manière très significative les deux périodes caractéristiques de la région sahélienne ; une période largement excédentaire de 1942 à 1969 et une période de sécheresse pendant les années 70 et 80. En plus de ces phases, la dernière décennie (1994-2005) est caractérisée par une situation très particulière où oscillent de courtes périodes d'excès pluviométriques (Nouaceur Z., 2009).

L'examen des températures pour les périodes 1931-1960 et 1961-1990 par l'Office National Météorologique (ONM) met en évidence une hausse des températures moyennes sur l'ensemble du pays au cours des saisons d'hiver et d'automne, et une hausse nette des températures minimales et maximales sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis la décennie 70 et se prolongeant jusqu'à nos jours. L'examen des précipitations pour les mêmes périodes (1931-1960 et 1961-1990) montrent une diminution des pluies en automne et en hiver sur le Nord, alors qu'au printemps, la pluviométrie est plus importante à l'Ouest, au Centre et au Sud du pays et il y a diminution des précipitations à l'Est (Boucherf D., 2007).

L'analyse des données de températures sur plus de 40 stations du réseau de l'Office National de la Météorologie effectuée sur la période 1950-2005 met en évidence une augmentation des températures maximales annuelles de 1,2°C (0,6 à 2,3 °C) et saisonnières de 1,6°C en été (0,9 à 2,2°C ; maximum en août) (Boucherf D., 2010).

Un comparatif des normales de température des deux périodes standards : 1931-1960 et 1961-1990 effectué pour plusieurs stations météorologiques maghrébines (Alger, Oran, Annaba, Casablanca, Agadir, Ouarzazate, Tunis, Gabès) a montré que la tendance à la hausse de température est nette pendant la saison d'hiver sur l'ensemble des stations analysées et que l'augmentation de la température annuelle moyenne est perceptible pour la grande majorité des stations du Maghreb (Hassani M.I., 2008). Cette température semble rester en constante augmentation comme le cas de la station d'Oran. L'examen de l'évolution des pluies par la comparaison des normales de pluies saisonnières des deux périodes standards des mêmes stations indique des évolutions assez contrastées d'une région à une autre. En termes de ruissellement, il est relevé une tendance négative des apports chronologiques au cours des deux dernières décennies dans la majorité des bassins hydrographiques du Maghreb, à l'exemple du bassin de l'Oum Er Rebia (Maroc).

La décennie 1970 marque une rupture climatique significative sur le plan thermique, en Afrique du Nord-Ouest (entre le Maroc et la Mauritanie) (Amraoui L., 2009). L'étude de l'évolution et la détection des ruptures des séries chronologiques des températures hivernales de 1950 à 2008, permet de mettre en évidence le tournant climatique des années 70 dans cette région. Le mois de décembre affiche une forte tendance à la hausse des températures sur la totalité du Maroc et du Sahara Occidental en plus de la partie saharienne de la Mauritanie. La tendance à la hausse s'amenuise dès que l'on pénètre dans

la partie sahélienne de la Mauritanie. L'extrême sud de la Mauritanie enregistre une faible tendance au refroidissement (entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ et $-0,4^{\circ}\text{C}$). Le mois de janvier se distingue par une tendance majoritaire au refroidissement. En effet, à l'exception du Sahara Occidental et la bande côtière de toute la zone d'étude, la tendance des températures entre 1950 et 2008 pendant le mois de janvier est négative. Le refroidissement est plus marqué vers le sud-est de la Mauritanie avec un maximum de -1°C . Cette tendance au refroidissement est confirmée en février au sud-est de la Mauritanie mais elle ne concerne significativement que l'extrême sud-est avec un maximum de $-1,25^{\circ}\text{C}$. En dehors de cette zone, la tendance au réchauffement s'impose sur la totalité de l'Afrique du Nord-Ouest avec un maximum de $1,4^{\circ}\text{C}$ localisé au niveau du Sahara Occidental.

De nombreuses études ont lié les variations du régime pluviométrique de la Méditerranée à la circulation atmosphérique générale (Salameh T., 2008 ; Xoplaki E., 2000, Lopez J., et al., 2010). De ce fait, il est crucial de comprendre les causes, processus and physical mechanisms on different time les processus et les mécanismes physiques à différentes scales as well as their link to the large-scale climate, échelles régionales ainsi que leur lien avec le climat à grande échelle, which is responsible for the Mediterranean wet season qui est responsable de la variabilité et des tendances des précipitations de la région Méditerranéenne.

1-2-2- Influence de la circulation atmosphérique générale sur le climat méditerranéen

Du point de vue climatique, la région méditerranéenne constitue une zone de transition entre les climats semi-arides (le sud du bassin) et les climats tempérés (le nord du bassin), sous l'influence des circulations synoptiques des latitudes moyennes et de la variabilité climatique tropicale, particulièrement durant la période hivernale (en été, du fait de la progression vers le nord de l'anticyclone des Açores, la région méditerranéenne est plus isolée et largement sous l'influence de circulations atmosphériques locales). Au nord une grande partie de la variabilité atmosphérique est sous l'influence de flux atmosphériques d'ouest contrôlés par les positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande et modulée par l'intensité et la phase de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) (Hurrell and Van Loon, 1997 ; Plaut et al., 2001 ; Xoplaki, 2002 ; Hurrell et al., 2003 ; D'unkeloh and Jacobeit, 2003 ; Trigo et al., 2004 : in Salameh T., 2008).

Se situant au sud du "couloir" des tempêtes de l'Atlantique Nord, le bassin ouest de la Méditerranée est sous l'influence des dépressions des moyennes latitudes qui contrôlent le taux de précipitations, surtout pendant l'hiver quand l'influence de la NAO est la plus importante. Le sud du bassin est sous l'influence de la partie descendante de la cellule de Hadley associée à l'anticyclone des Açores et l'est du bassin est sous l'influence de téléconnexions avec l'oscillation sud d'El Nino (El Nino Souther Oscillation, ENSO) et la mousson asiatique ([Rodwell et Hoskins 1996 ; Rodo et al., 1997 ; Price et al. 1998 ; Reale et al., 2001 ; Mariotti et al., 2002] : In [Salameh T., 2008]).

Selon le GIEC (GIEC, 2007), les climats de l'Afrique du nord dépendent de l'oscillation nord atlantique (l'Afrique orientale et australe sont sous influence forte de ENSO, et ceux de l'Afrique de l'ouest de la température de surface de l'océan atlantique, de la dynamique de l'atmosphère et d'effets de surface).

L'indice NAO a connu au cours du 20^{ème} siècle une très grande variabilité. Du début du 20^{ème} siècle jusqu'en 1930 environ (à l'exception des hivers 1916 à 1919), l'indice NAO était élevé : ainsi, des vents plus forts qu'à l'accoutumée ont apporté une influence

maritime au-dessus de l'Europe, ce qui contribua aux températures européennes plus élevées que la normale durant cette période. Du début des années 40 jusqu'au début des années 70, l'indice NAO a eu tendance à diminuer, ce qui correspondit à une période où les températures hivernales étaient fréquemment inférieures à la normale. Une forte hausse de l'indice NAO s'est produite au cours des 25 dernières années. Depuis 1980, l'indice NAO est resté dans une phase fortement positive et a tendance à augmenter. Jamais depuis le début du 20ème siècle, des hivers n'ont montré des indices positifs aussi prononcés. Cette situation a beaucoup contribué au réchauffement observé des températures de surface de l'hémisphère nord au cours des deux dernières décennies. Une stabilisation des températures a été constatée depuis 2008 (Szalai S., 2003).

Des études ont montré que la diminution des précipitations surtout hivernales dans la région méditerranéenne durant les dernières années sont liées à la phase positive et persistante de l'oscillation nord atlantique (NAO) (Xoplaki E., et al., 2000). Un indice caractérise cette oscillation : les valeurs positives de l'indice correspondent à une pluviométrie en dessous de la normale, alors que les valeurs négatives correspondent à une pluviométrie excédentaire.

L'analyse des corrélations entre les précipitations et l'oscillation nord atlantique, montre que la NAO a plus d'influence pendant les mois d'hiver ; décembre, janvier et février. (Lopez J., et al., 2010)

Les valeurs de température et de précipitation, montrent que de nombreux épisodes secs sont intervenus au cours des derniers 50 000 ans, et en particulier pendant le dernier glaciaire. Une configuration atmosphérique d'une NAO positive, aurait prédominé pendant ces périodes d'aridité, impliquant une stabilité anticyclonique sur le bassin Sud-ouest méditerranéen et favorisant le transport atmosphérique en provenance d'Afrique (Combourieu Nebout N. et al., 2009).

Plusieurs études mettent en évidence l'absence d'une corrélation significative d'El Niño sur le bassin méditerranéen (Ricard J.L., 2000). Les chercheurs qui ont déterminé les zones sous influence directe d'El Niño n'ont pas inclus l'Afrique du Nord et l'Europe.

Conclusion

Le climat et plus exactement les précipitations et les températures ont connu des variations importantes. Un réchauffement et une baisse des précipitations sont observés depuis la moitié des années 1970 à l'échelle du globe et à l'échelle régionale « Méditerranée ». La circulation atmosphérique générale joue un rôle déterminant dans la variation du climat méditerranéen qui se trouve plus influencé par l'Oscillation Nord Atlantique.

Chapitre 2 : Indicateurs de variations ou de changements climatiques et leurs applications

Introduction

La recherche sur les indicateurs de changement ou de variabilité climatique est devenue une priorité pour beaucoup de chercheurs. Par le monde, de nombreuses études ont été

menées pour la détection de ces changements. C'est dans cette lancée que les séries de données chronologiques sont soumises aux tests de tendance sur les valeurs annuelles et mensuelles. Les méthodes graphiques (droites de régressions des moindres carrés) ont été utilisées et les tests statistiques choisis de manière à confirmer ou infirmer les résultats des méthodes graphiques.

2-1- Tests d'homogénéité et de stationnarité

2-1-1- Tests d'homogénéité (Ondo J.C. et al, 1997, Beaulieu C. et al, 2007)

Dans une analyse des séries chronologiques, il est important de vérifier l'hypothèse que les observations de la chronique sont identiquement distribuées, cela revient encore à vérifier que les observations de la chronique sont homogènes. La vérification de cette hypothèse est nécessaire avant d'entreprendre toute étude d'inférence statistique. Le caractère d'homogénéité des observations d'une série chronologique est donc une hypothèse fondamentale dans une étude statistique, et mérite d'être traité avec beaucoup de sérieux.

- a -Tests d'homogénéité basés sur la fonction de répartition
 - **Test du khi-deux** : Le test du Khi-deux (χ^2) est un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse H_0 selon laquelle les données observées sont engendrées par un modèle faisant intervenir une loi de probabilité, ou une famille de lois de probabilité.
 - **Test de Kolmogorov-Smirnov** : Le test de Kolmogorov-Smirnov est un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse H_0 selon laquelle les données observées sont engendrées par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable. Mais contrairement au test du Khi-deux, la loi théorique doit ici être continue et entièrement spécifiée, sans paramètre inconnu.
 - **Test de Cramer Von Mises** : Le test de Cramer Von Mises a les mêmes applications que le test de Kolmogorov. La différence entre ces deux tests réside dans le fait que pour le test de Kolmogorov seul l'écart maximum entre la distribution empirique et la distribution d'ajustement entre en considération, alors que l'indicateur d'écart du test de Cramer-Von Mises prend mieux en compte l'ensemble des données en ce sens que la somme des écarts intervient. Le test de Kolmogorov est donc beaucoup plus sensible à l'existence de points aberrants dans un échantillon que le test de Cramer Von Mises.
- b -Test non paramétrique
 - **Le test de Mann-whitney** : Ce test est décrit par Lachance (1996). Il permet de faire des inférences sur les médianes des deux populations. Au niveau des hypothèses, il implique que les deux populations dont sont issus les sous-échantillons aient des distributions de même forme et que ces sous-échantillons soient indépendants. Lorsque les données des sous-échantillons ne proviennent pas des populations distribuées normalement, le test de Mann-whitney sert à tester l'homogénéité des observations de l'échantillon en utilisant les moyennes empiriques. Ce

test non paramétrique a une efficacité beaucoup plus élevée que les tests d'homogénéité basés sur la fonction de répartition empirique.

c - Test paramétrique

- **Test de normalité** : C'est un test paramétrique décrit par Lachance (1996). Il s'applique dans le cas de grands échantillons ($n_1 \geq 30, n_2 \geq 30$).
- **Test de Student** : Le test de Student est un test paramétrique qui permet de comparer les moyennes de deux échantillons statistiques. Ce test est applicable pour les petits échantillons ($n_1 \leq 30, n_2 \leq 30$). L'hypothèse préalable de ce test est que les deux populations sont distribuées normalement.

Si les données de l'échantillon proviennent d'une population normale, les tests paramétriques sont plus efficaces que les tests non paramétriques. Si par contre les données de l'échantillon ne proviennent pas d'une population normale, il est préférable d'utiliser les tests non paramétriques. Dans cette catégorie de tests, le test de Mann-whitney a une efficacité beaucoup plus élevée que les tests d'homogénéité basés sur la fonction de répartition empirique et les autres tests d'homogénéité.

2-1-2- Tests de stationnarité (Faucher D. et al, 1997, Beaulieu C. et al, 2007)

Une série de données est dite stationnaire, lorsque l'on ne retrouve pas de variations temporelles significatives, autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement. On peut détecter une non-stationnarité en examinant la moyenne ou la variance de la série et en évaluant s'il y a eu un changement significatif à une date donnée.

Afin de tester la stationnarité de la moyenne d'une série chronologique de données, deux types de tests peuvent être utilisés: les tests paramétriques et les tests non paramétriques.

Les tests paramétriques sont effectués en considérant que la statistique du test est distribuée selon une fonction de distribution bien définie (loi normale, loi Gumbel...). Mais lorsque l'on rejette, par exemple, l'hypothèse de normalité de la série ou que l'on ne dispose pas de suffisamment de données pour vérifier cette hypothèse, ces tests ne peuvent être utilisés. On peut alors avoir recours à des tests non paramétriques, qui permettent de s'affranchir de l'hypothèse de normalité, en fondant l'analyse exclusivement sur les rangs des observations. L'avantage de ces tests est que l'on ne doit poser aucune hypothèse sur la distribution des données et que l'on peut très souvent effectuer le test même avec un nombre limité de données.

2-1-2-1- Tests paramétriques de stationnarité de la moyenne

- **Test de Student** : Le test de Student relatif à la comparaison de la moyenne de deux populations peut être utilisé pour évaluer l'existence d'un changement brutal dans la moyenne d'une population. Ce test consiste à vérifier si la moyenne des données situées avant le point de changement est significativement différente de la moyenne des données situées après ce changement.
- **Test des déviations cumulées** : Le test des déviations cumulées peut être utilisé pour détecter la présence d'un changement brutal dans la moyenne d'une série de données. Ce test suppose que les données soient indépendantes et normalement distribuées.

- **Test du rapport de vraisemblance de Worsley:** Le test de Worsley peut être utilisé pour détecter la présence d'un changement dans la moyenne d'une série de données. Il est plus puissant si la rupture survient aux extrémités de l'échantillon de la série de donnée (Ondo J.C., 2002).
- **Test de Cramer :** Le test de Cramer peut être utilisé pour comparer la moyenne de sous-échantillons d'une série de données, avec la moyenne générale de la série entière. Ce test consiste à déterminer si les différences de moyennes sont assez grandes pour rejeter l'hypothèse du caractère aléatoire de la série d'observations, c'est-à-dire pour rejeter l'hypothèse d'absence de changement ou de tendance de la moyenne.
- **Approche Bayésienne de Lee et Heaghinian :** Lee et Heaghinian ont proposé une méthode basée sur l'approche bayésienne pour calculer les distributions marginales et jointes a posteriori des paramètres τ et δ , correspondant respectivement au moment et à l'amplitude du changement. Cette procédure permet ainsi d'associer une probabilité à chaque valeur des paramètres τ et δ .
- **Procédure de segmentation d'Hubert :** Hubert et al. (1989) ont proposé une procédure originale de segmentation des séries de données. Cette segmentation peut éventuellement mettre en évidence une évolution au sein de la série, sous forme de séquences successives. On définit un segment de taille m comme étant une séquence des données issues d'une série chronologique de taille n . Pour tout ordre de segmentation m compris entre 1 et n , il existe plusieurs segmentations possibles. Il s'agit de déterminer parmi toutes ces possibilités, quelle segmentation est la plus appropriée pour la série. Cette segmentation optimale, n'est acceptable que si les moyennes de deux segments contigus sont significativement différentes. La segmentation qui sera retenue comme étant la segmentation optimale, devra nécessairement être valide au sens du test de Scheffé. L'hypothèse nulle de ce test (la série étudiée est stationnaire) est acceptée si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2. Elle sera rejetée dans le cas contraire.

2-1-2-2- Tests non paramétriques de stationnarité de la moyenne

- **Test de Wilcoxon :** Le test de Wilcoxon peut être utilisé pour évaluer s'il existe une différence significative entre la moyenne d'une série avant et après le point de rupture. Évidemment, il faut connaître a priori le moment de la rupture pour être en mesure d'effectuer ce test.
- **Test de Mann-Whitney :** On peut utiliser le test de Mann-Whitney (1947) pour évaluer s'il existe une différence significative entre la moyenne d'une série avant le changement et la moyenne de la série après le changement. On doit cependant connaître a priori le moment du changement pour être en mesure d'effectuer ce test.
- **Test de Terry (1952)- Hoeffding :** Ce test consiste à comparer la moyenne de deux sous-échantillons d'une série de données. On doit d'abord ranger les données en ordre croissant et leur associer un rang comme dans le cas du test de Mann-Whitney. Par la suite, les rangs sont remplacés par la valeur correspondante de la variable normale centrée réduite.
- **Test de Van der Waerden:** Ce test consiste aussi à comparer la moyenne de deux sous-échantillons d'une série de données en remplaçant les observations par les valeurs de la distribution normale centrée réduite associées à la valeur de leur rang.

- **Test de Bell-Doksum** : Ce test consiste à comparer la moyenne de deux sous-échantillons d'une série de données. On doit tirer de façon aléatoire un nombre n de valeurs de Z . Ce nombre n doit correspondre à la taille de la série de données. On ordonne ensuite ces valeurs de Z par ordre croissant en leur assignant un rang.
- **Test de Terpstra (1952) – Jonckheere** : Ce test a été développé indépendamment par Terpstra (1952) et Jonckheere (1954). Il sert à vérifier l'existence de multiple changement de moyenne dans une série de données. Il consiste à diviser la série de n observations en k sous-échantillons où chacun de ceux-ci est comparé au suivant.
- **Test de Kruskal-Wallis** : Ce test très utilisé en pratique, sert à vérifier l'existence de multiple changement de moyenne d'une série de données, en vérifiant l'égalité des moyennes de k sous-échantillons. Contrairement au test de Terpstra-Jonckheere, l'hypothèse alternative est qu'au moins une des moyennes est différente des autres.
- **Test de Mann** : Le test de Mann (1945) est utilisé pour tester si les données d'une série sont ordonnées aléatoirement contre l'alternative d'une tendance dans le temps. Considérons les rangs r_j des n observations rangées en ordre chronologique.
- **Test de Kendall** : Le test d'indépendance de Kendall (1976) peut être utilisé pour tester la stationnarité d'une série de données. Il consiste à assigner une valeur de 1 à chacune des observations x supérieure ou inférieure à l'observation la précédant et à l'observation la suivant.
- **Test de Pettitt** : Pettitt (1979) a proposé un test qui est basé sur la statistique de Mann-Whitney (1947). Ce test permet de déterminer à quelle date un changement a pu se produire dans la moyenne d'une série de données chronologiques de taille N .
- **Bootstrap** : Le bootstrap est basé sur de « nouveaux échantillons » obtenus par tirage avec remise à partir de l'échantillon initial. Les méthodes de Bootstrap sont souvent utilisées pour la recherche de changement de variance.

2-1-3- Tests statistiques les plus utilisés dans la détection d'une tendance ou d'un changement brutal (Robson A.J. et al, 2004)

Un changement dans une série de données peut se produire par plusieurs manières, il peut être progressif (tendance), brutal (changement), ou prendre une forme plus complexe. Ce changement peut affecter la moyenne, la variance et tout autre aspect des données.

Les méthodes basées sur les tests non-paramétriques, en particulier les méthodes de ré-échantillonnage, devraient être plus utilisées. Ces méthodes sont recommandées parce qu'elles conviennent particulièrement aux données hydrologiques, qui sont souvent fortement asymétriques, saisonnières et auto-corrélées. Les techniques de ré-échantillonnage sont flexibles, robustes et puissantes, et ne nécessitent aucune hypothèse sur la forme de distribution des données, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire que les données soient normalement distribuées. Un exemple de cette méthode, les tests basés sur le rang qui utilisent le rang des valeurs des données et n'ont pas les valeurs réelles. La plupart des tests sur le rang supposent que les données sont indépendantes et identiquement distribuées. Ces tests présentent l'avantage d'être robustes et simples à utiliser, mais, généralement, ils sont moins puissants que les tests basés sur une approche paramétrique (Robson A.J. et al, 2004).

2-1-3-1- Tests de détection de changement brutal

- **Test de Pettitt** : Ce test est considéré comme robuste au changement d'une série chronologique et relativement puissant, comparé par exemple au test de Wilcoxon-Mann-Whitney et au test de Mann-Kendal utilisé pour une tendance.
- **Test de Wilcoxon-Mann-Whitney / Mann-Whitney** : c'est un test basé sur le rang, qui recherche les différences entre deux groupes d'échantillons indépendants (Siegel & Castellan, 1988; WMO, 1988; Helsel & Hirsch, 1992). Il est basé sur le test statistique de Mann-Kendall, Mann-Kendall test statistic (see test 9 below), but is calculated for subsets of the series in il est calculé pour les sous-ensembles de la série afin de détecter le point de changement dans la moyenne. In its basic
- **Test des déviations cumulées** : ce test peut être utilisé pour détecter la présence d'un saut (changement brutal) dans la moyenne d'une série de données. Il est basé sur la somme des écarts par rapport à la moyenne et suppose la normalité.
- **Test de Kruskal-Wallis** : basé sur le rang, il permet de tester si plusieurs échantillons indépendants sont issus de la même population. Ce test peut être perçu comme une généralisation du test de Wilcoxon-Mann-Whitney à plus de deux échantillons.
- **Test t de Student** : C'est un test paramétrique standard pour vérifier si deux échantillons have different means. ont des moyennes différentes. In its basic form it assumes normally distributed data and a known σ suppose que les données soient normalement distribuées, pour détecter le point de changement.
- **Test du rapport de vraisemblance de Worsley** : ce test est similaire au t de Student, mais peut être utilisé lorsque le point de changement est inconnu. Il exige la normalité.

2-1-3-2- Tests de détection d'une tendance

- **Le rho de Spearman** : il s'agit d'un test basé sur le rang, c'est le coefficient de corrélation de Spearman qui permet d'étudier l'existence de relation entre deux variables.
- **Test de Mann-Kendall** : c'est aussi un test basé sur le rang similaire au rho de Spearman (même puissance), mais en utilisant une méthode différente de corrélation.
- **Régression linéaire** : le test statistique d'une régression linéaire est la pente de la régression. C'est l'un des tests les plus communs pour la détection d'une tendance, il suppose que les données are normally distributed. soient normalement distribuées.

2-2- Indices pluviométriques

Dans un pays en grande partie semi-aride such as México, precipitation is a precious natural resource and it is quite variable. comme l'Algérie, la précipitation est une ressource naturelle précieuse, et est assez variable. Thus any Ainsi, toute fluctuations or trends in its geographical distribution and quantity could have significant implications fluctuation ou tendance en terme de quantité et de répartition géographique, pourrait avoir des conséquences importantes for socioeconomic sectors such as agricultural productivity, food security, water quality, water sur différents secteurs socio-économiques tels que la productivité agricole, la sécurité alimentaire, la qualité de l'eau, la ressource management, land use, human health, as well as ecological impacts such as biodiversity. gestion des ressources en eau, l'utilisation des terres, la santé humaine, ainsi que des impacts écologiques comme la biodiversité.

Les indices les plus utilisés pour la caractérisation du régime pluviométrique, et qui ont fait l'objet de plusieurs études, notamment dans le suivi de la sécheresse, sont : l'indice de sécheresse de Palmer (Palmer Drought Index **PDI**), et l'indice pluviométrique standardisé (Standardized Precipitation Index **SPI**). Ces indices sont aussi considérés comme indicateurs de changement ou de tendance dans le régime pluviométrique.

2-2-1- Indice de sécheresse de Palmer (Guttman N.B., 1998)

L'indice de sécheresse de Palmer a été conçu pour quantifier une sécheresse météorologique. Cet indice a été élaboré par WC Palmer en 1965 and called the Palmer Drought Severity Index (PDSI)., appelé l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (PDSI). It was intended to retrospectively look at wet and dry

Drought was considered tThe index is calculated by first carrying out a L'indice est obtenu sur la base d'un hydrologic accounting by months for a long series of calcul hydrologique pour chaque mois sur une longue série d'années the user communi, il exige donc à la fois les précipitations and temperature observations. et la température uThe latter variable uutilisée dans l'estimation de l'évapotranspiration, et tient compte aussi de l'humidité du sol.

Le PDSI a été développé pour être standardisé afin qu'il soit utilisé à tous les endroits et toutes les époques. However, Cependant, the referenced studies show that the intended certaines études montrent que la standardisation, en réalité, n'est pas valide. Spatial and temporal comparisons may therefore be LLa variation spatiale et temporelle de l'indice de Palmer peut donc être misleading and lead to erroneous conclusions by user trompeuse et conduire à des conclusions erronées.

If the SPI is to replace the Un nouvel indice, appelé l'indice standardisé de précipitations (SPI), a été mis en œuvre pour donner une meilleure représentation de l'humidité et dryness than the Palmer indices. la sécheresse que l'indice de Palmer.

2-2-2- Indice pluviométrique standardisé (Guttman N.B. 1998, Giddings L. et al, 2005)

L'indice standardisé de précipitations (SPI : Standardized Precipitation Index), a été mis en œuvre par McKee en 1993 pour améliorer la détection de la sécheresse et la capacité de surveillance. In contrast to the

Contrairement à l'indice de Palmer, qui est basé sur le bilan d'eau uniquement à l'échelle du mois impliquant les précipitationstion, evapotranspiration, runoff and soil moisture, the, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'humidité du sol, le SPI was developed to quantify a precipitation deficitSPI a été développé afin de quantifier un déficit des précipitations for different time scales. à différentes échelles de temps qui semblent êtreimportant to the water analyst. importantes à l'hydrologue.

L'indice pluviométrique correspond au rapport de l'écart à la moyenne sur l'écart-type des hauteurs pluviométriques annuelles.

$$IPS_t = \frac{x_t - \bar{x}_t}{\sigma_t}$$

Où :

IPS_t : Indice pluviométrique de l'année ;

x_t : Hauteur de pluie précipitée au cours de l'année ;

\bar{x}_t : Moyenne interannuelle des hauteurs de pluie sur la période observée,

σ_t : écart-type de la pluie moyenne interannuelle.

Le SPI a la vocation à indiquer à lui seul si l'année peut être qualifiée d'excédentaire ($IPS > 0$) ou de déficitaire ($IPS < 0$). McKee a suggéré une classification du SPI de 2 à -2.

2-2-2-1- Avantages et limites de l'indice pluviométrique standardisé (Hayes M.J. et al, 1999)

The first advantage is its simplicity. Le premier avantage est bien sa simplicité, l'indice SPI est basé uniquement sur les précipitations. The PDSI calculations are com-

Deuxièmement, le SPI est versatile: it can be calculated on any timescale, which un indice polyvalent, il peut être calculé sur différentes échelles de temps ce qui gives the SPI the capability to monitor conditions donne au SPI la capacité de surveiller d'importantes conditions important for both agricultural and hydrological ap- tant pour l'agriculture et les applications hydrologiques applications.. This versatility is also critical for monitor- Cette polyvalence est également critique pour suivre la dynamique temporelle d'une sécheresse, tenant compte de son development and decline, which have always been développement et son déclin (achèvement), qui ont toujours été difficult to track with other indices. difficiles à suivre avec d'autres indices. The third advan-

Le troisième avantage du SPI est qu'en raison de sa distribution normale, the frequencies of the extreme and severe drought, les classifications des fréquences sèches et humides pour tout endroit et toute échelle de temps sont consistent. cohérentes. McKee et al.

Enfin, parce qu'il est based only on precipitation and not on soil moisture basé uniquement sur les précipitations et non pas sur l'humidité du sol conditions as is the PDSI, the SPI is just as effective qui est une des conditions du PDSI, le SPI est tout aussi efficace during winter months and is also not adversely affected pendant les mois d'hiver et n'est pas affecté by topography. par la topographie.

Although developed for use in Colorado, the SPI Bien qu'il soit développé pour une utilisation au Colorado, le SPI can be applied to any location with a dataset of 30 yr peut être appliqué à n'importe quel endroit avec un ensemble de données de 30 ans or longer. ou plus. Montana, Wyoming, New Mexico, South

2-2-2-2- Quelques applications particulières de l'indice pluviométrique standardisé (Giddings L. et al, 2005)

Researchers have employed SPI to examine numerous questions such as, drought, teleconnections Les chercheurs ont employé l'indice SPI pour répondre à de nombreuses questions telles que la sécheresse, les inondations et les rendements des cultures.

Bordi *et al.* . Bordi *et al.* (2001) demonstrated that SPI can be used as a tool in the historical reconstruction (2001) ont démontré que le SPI peut être utilisé comme un outil dans la reconstruction historique of drought events in locations in Italy. des épisodes de sécheresse dans certains endroits de l'Italie. Lloyd-Hughes and Saunders (2002) developed a high spatial

Lloyd-Hughes et Saunders (2002) ont développé une résolution spatiale élevée resolution, multi-temporal climatology for the incidence of 20th century European drought using , multi-temporelle de l'incidence de la sécheresse européenne du 20^{ème} siècle en utilisant le SPI. SPI. When the SPI analysis was extended to the Northern Hemisphere some interesting spatially

Le phénomène El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon has been related to several weather and El Niño (ENSO) est lié à plusieurs conditions météorologiques et climatic extremes around the world. climatiques extrêmes dans le monde. Fernández and Fernández (2002) identified several zones in Fernández (2002) a identifié plusieurs zones the continental region of southern South America, where teleconnections exist between the extreme dans la région continentale du sud de l'Amérique du Sud, où les télé-connexions existent entre les extrêmes phases of ENSO and precipitation zones characterized through the use of SPI. phases de l'ENSO et les zones caractérisées par les précipitations en utilisant le SPI.

Seiler *et al.* . Seiler *et al.* (2002) used SPI to study the recurrent floods affecting the southern Córdoba (2002) ont utilisé le SPI pour étudier les inondations récurrentes affectant le sud de Province in Argentina, as a tool for monitoring flood risk in that region. Province de Cordoba d'Argentine, comme un outil de suivi des risques d'inondation dans cette région. SPI satisfactorily explains Le SPI explique de façon satisfaisante les conditions entraînant le développement des trois principales inondations dans la région au cours des 25 dernières years. années. They proposed applying SPI as an effective tool for a regional climate risk monitoring system. Ils ont proposé aussi l'application du SPI comme un outil efficace pour un système de surveillance des risques climatiques régionaux.

Sims *et al.* . Anctil *et al.* . Anctil et al. (2002) conducted a regional analysis of 5-day precipitation and demonstrated that (2002) ont mené une analyse régionale sur 5 jours de précipitations et ont démontré que SPI can be used beyond its usual diagnostic function, by quantifying the probability that precipitation le SPI peut être utilisé au-delà de sa fonction de diagnostic d'habitude, en quantifiant la probabilité que les précipitations to come will put an end to an ongoing drought. à venir mettront un terme à une sécheresse en cours.

2-3- Travaux réalisés pour la détection d'un changement ou d'une variation climatique par les différentes méthodes statistiques

Les méthodes présentées précédemment (ainsi que d'autres) ont beaucoup servi à l'analyse des longues séries de données chronologiques dans le but de détecter une variation ou un changement brutal au sein de ces séries. Ces méthodes ont été le plus souvent utilisées pour caractériser le régime pluviométrique d'une région donnée.

- a - Applications des tests statistiques pour la détection d'une rupture

L'évolution climatique des dernières décennies a déjà fait l'objet de nombreuses études notamment en zone sahélienne mais aussi plus au sud en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Toutes ces études ont validé l'hypothèse d'une baisse sensible des ressources en eau à partir du début des années 1970. Des séries chronologiques au pas de temps annuel portant sur des variables caractéristiques des différents aspects à traiter ont été constituées pour être soumises à une étude de stationnarité.

En Afrique de l'Ouest, une méthodologie statistique a été utilisée pour la détection des sécheresses (Vannitsem S. et al, 1991). Dans le but de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques, trois différents tests non paramétriques ont été utilisés, le test de Mann-Kendall, le test de Lombard et le test de Pettitt. Le test de Mann-Kendall permet de déceler l'existence d'une seule tendance globale au sein de la série analysée. Le test de Lombard, permet d'évaluer le nombre de changements de moyenne significatifs au sein d'une série. Le test de Pettitt est par contre capable d'estimer la position d'un changement de moyenne dans une série ou une sous-série, mais sans pouvoir en isoler plus d'un. Cette méthodologie a permis de mettre en évidence et de différencier les trois sécheresses majeures qui se sont produites en Afrique de l'Ouest au cours du 20^{ème} siècle.

Toujours en Afrique de l'Ouest non sahélienne (du Sénégal à l'ouest à la République de Centrafrique à l'est), une étude sur la variabilité pluviométrique a été effectuée (Lubes-Niel H., 1998). Pour cela, cinq tests ou procédures statistiques ont été retenus le test de Kendall, le test de Pettitt, le test de Buishand, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la procédure de segmentation d'Hubert. De nos jours, ces tests sont souvent utilisés dans les études de stationnarité de séries hydrométéorologiques, et déjà éprouvés dans le contexte africain. Leur utilisation sur des séries chronologiques de données de pluie (et de débit) en de nombreux points de mesure de l'Afrique de l'ouest a permis de caractériser dans le temps et dans l'espace des changements significatifs de moyenne autour des années 1970.

En Tunisie centrale, l'étude des séries pluviométriques par la méthode des variables centrées réduites, a mis en évidence une certaine baisse des totaux annuels entre 1977 et 1989 (Berguaoui Z. et al, 2000). Les méthodes statistiques de détection de rupture de la stationnarité dans les séries chronologiques à savoir, le test de Pettitt et la procédure de segmentation d'Hubert n'ont pas montré de rupture dans les séries de pluviométries annuelles. Par contre elles ont détecté un certain nombre de changements ; en 1976 dans le nombre de jours de pluie, dans le cumul de pluies supérieures à 30 mm et dans sa contribution dans le total annuel.

En 2004, l'Agence Nationale des ressources hydrauliques (ANRH, 2009) a consacré une étude sur l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Nord de l'Algérie. L'analyse des précipitations par la méthode du double cumul met en évidence, une nette tendance à la baisse à partir de 1975 (plus de 25 années successives), les cinq plus faibles totaux annuels du siècle ont été enregistrées, pendant cette période.

La pluviométrie est déficitaire pour les années 2000 et 2001 sur l'ensemble des régions, pour ensuite, connaître le caractère humide avec des écarts à la moyenne compris entre 0.4% et 2.7 %, au Centre, entre 0% et 51.1 % à l'Est et entre 3.2% à 17.7 % à l'Ouest. Depuis 2002, la pluviométrie se rapproche de la normale pour les régions Ouest et Centre et est à la hausse à l'Est. La différence entre l'Est et le reste des régions réside essentiellement dans l'intensité de cette sécheresse. Le déficit est de l'ordre de 13 % à l'Est, de 13,6 % au Centre alors qu'à l'Ouest il est de 16.1 %.

Au Nord Ouest Algérien, Meddi H. et al. (2007) ont utilisé le test de Pettitt, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la segmentation d'Hubert pour déceler d'éventuels changements sur 10 séries pluviométriques. L'étude a montré une rupture dans la décennie 70 (baisse de la pluviométrie) pour la quasi-totalité des postes étudiés. La variabilité interannuelle des pluies augmente lorsque l'on se rapproche des régions arides. Dans cette même étude, l'analyse de la longue série de la station d'Oran (1877-1997) a révélé que la période de déficit la plus sévère s'étale sur une douzaine d'années, de 1977 à 1988 avec un léger excédent durant l'année 1979 et un déficit maximal (-213,6 mm) enregistré durant l'année 1922.

Sur la période étudiée (120 ans), 62 années semblent être déficitaires, dont 21 ayant été affectées par une sécheresse modérée et 11 pouvant être considérées comme sèches. Toujours pour la même station mais pour la période de référence (1950-1987), sur la totalité de la série, 25 années sont déficitaires (52 %), 10 années sont considérées comme modérément sèches et 3 années comme sèches.

En Afrique du Nord-Ouest (entre le Maroc et la Mauritanie) (Amraoui L., 2009), l'étude des séries chronologiques des températures hivernales de 1950 à 2008 par la méthode de segmentation met en évidence la succession de plusieurs ruptures de stationnarité des séries chronologiques des températures pendant les trois mois de l'hiver. Il en ressort que les deux tendances divergentes mais simultanées des températures entre, d'un côté, les zones côtières et le proche Océan qui ont connu une forte tendance au réchauffement et, de l'autre côté, le continent, notamment la Mauritanie qui a connu une tendance au refroidissement, sont liées à des ruptures de stationnarité qui sont intervenues pendant la décennie 1970.

Des données de températures moyennes mensuelles rassemblées, entre 1901 et 1988, pour six stations météorologiques de Tunisie ont été étudiées en vue d'estimer leurs périodicités dominantes et leurs tendances. L'utilisation de la procédure de Siddiqui & Wang (1984) a permis de détecter dans les séries originales une seule période significativement dominante qui est celle des 12 mois de l'année. Le test de corrélation de rang de Kendall a montré que les séries ne sont pas tendanciennes. L'application du test de corrélation du rang de Kendall a conduit à des résultats montrant que les séries des températures moyennes mensuelles désaisonnalisées de six stations de la Tunisie ne présentent pas de tendances significatives (Benalaya A. et al., 1994).

b - Indice pluviométrique standardisé

Pour diagnostiquer le degré de sévérité d'une année pluvieuse ou sèche, l'indice pluviométrique standardisé (SPI Standardized Precipitation Index) est couramment utilisé. L'indice pluviométrique traduit ainsi un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée par rapport à la période de référence. Cet indice a été très utilisé sur plusieurs études effectuées en Amérique, notamment au Mexique.

En Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, l'utilisation de l'indice pluviométrique a permis de relever des périodes déficitaires et excédentaires sur la période d'étude 1936-1990 (Paturel J.E. et al, 1998). Une cartographie des résultats obtenus par le SPI, met en évidence trois périodes, la première période (1936-1950) qui est déficitaire, suivie d'une période excédentaire (1951-1968), puis une période déficitaire (1969-1990). Cette dernière période déficitaire, est marquée plus à l'Ouest. A l'Est, ce phénomène ne semble s'inscrire que dans l'histoire des variations « normales » des séries pluviométriques.

Au Nord-Ouest Algérien, Bekkoussa B. et al (2008) ont utilisé l'indice pluviométrique pour l'étude de la sécheresse sur la plaine de Ghriss pendant la période 1943-2004. La

période 1943-1973 apparaît majoritairement comme excédentaire. L'année 1973 marque le début de la régression des valeurs du module pluviométrique. La pluviométrie est déficitaire dans l'ensemble de la région à partir de 1981 (hormis pour l'année 1995, excédentaire). Durant la période 1981-2004 l'indice pluviométrique atteint les valeurs négatives les plus importantes, ce qui traduit un déficit important des totaux pluviométriques par rapport à la période de référence (1943-2004). Ce phénomène se prolonge sur plusieurs années successives, ce qui indique une sécheresse importante et persistante.

c - Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a souvent été utilisée comme méthode d'analyse du régime pluviométrique sur le Nord Algérien. L'analyse en composantes principales permet d'étudier les données en tenant compte de leurs caractères multidimensionnels. C'est une méthode particulièrement puissante qui consiste à trouver un nouvel espace où sont représentées les variables en perdant le minimum d'informations.

Dechemi N. et al (2000) ont analysé le régime pluviométrique de six stations représentatives du littoral Algérien : Ghazaouet, Oran, Alger, Skikda, Annaba, El Kala. L'analyse en composantes principales a été appliquée aux pluies annuelles et mensuelles des stations pour deux périodes distinctes 1954-1986 et 1987-1996. Les résultats obtenus ont montré une stabilité du régime pluviométrique à l'échelle annuelle pour toutes les stations. À l'échelle mensuelle des variations ont été observés à la station d'Alger au mois de février.

Medjerab A. (2005) a mené une étude sur la variabilité spatio-temporelle des pluies au Nord-Ouest de l'Algérie sur la période 1940-1990. L'analyse spatiale des pluies annuelles réalisée par la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de dégager à l'échelle spatiale, la répartition régionale des précipitations, et met en évidence les années qui ont un comportement identique ou opposé dans un espace défini. À l'échelle temporelle, l'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'opposer les années humides aux années sèches.

Le recensement des années sèches ou très sèches de la période d'étude, montre que le plus grand nombre d'années déficitaires a touché les décennies 40 et 80. Les résultats montrent également une persistance des totaux pluviométriques déficitaires sur plusieurs années successives. Entre ces deux grandes décennies de sécheresse, la pluviométrie a été normale ou excédentaire à l'échelle locale. Sept années pluvieuses consécutives ont été enregistrées entre la fin des années quarante et le début des années cinquante. A l'échelle régionale l'année hydrologique la plus sèche depuis 1940 à 1990 correspond à 1982-1983.

Norrant C. et Douguédroit A. (2003) ont utilisés l'Analyse en composantes principales avec rotation (ACPR), sur 40 stations pluviométriques réparties sur le pourtour méditerranéen et la côte atlantique à même latitude mais de façon non homogène. L'ACPR met en évidence six sous-régions : sous-région atlantique, golfes de Valence et du Lion, Maghreb, golfe de Gênes, Grèce et Moyen-Orient. Une seule tendance significative des précipitations existe dans le bassin méditerranéen sur la période 1915-1916/1987-1988 ; la diminution des pluies en Grèce. Ailleurs tout au long des saisons de pluie une diminution non significative des précipitations domine.

Conclusion

La variation d'une série de données chronologiques peut être déterminée par plusieurs tests statistiques en fonction du changement recherché brutal ou progressif. Les tests les

plus utilisés pour la détection d'un changement ou d'une rupture sont le plus souvent non paramétriques car ils ne tiennent pas compte de la normalité de la série de données, comme le test de Pettitt et le test de Kendall.

Les indicateurs de sécheresse sont efficaces pour le suivi du régime pluviométrique, l'indice pluviométrique standardisé est le plus simple, il ne tient compte que des précipitations et détermine les années (périodes) sèches et humides selon une classification.

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Chapitre3 : Présentation de la zone d'étude et des données climatologiques

Introduction

Le domaine d'étude concerne toute la partie Nord de l'Algérie, une présentation de ses caractéristiques géographiques, climatologiques et hydrographiques sera donnée dans ce chapitre. Nous exposerons aussi les données climatologiques et météorologiques utilisées pour la réalisation de notre travail.

3-1- Présentation de la zone d'étude

3-1-1- Situation géographique.

La zone d'étude se trouve limitée par les parallèles 33° et 37°N et par les longitudes 2° Ouest et 10° Est. La surface totale de cette zone est d'environ 227740 Km². Elle s'étend sur une largeur de 350 Km environ et 1000 Km le long du littoral. Le Maroc et la Tunisie constituent respectivement les limites Ouest et Est, la mer méditerranée constitue la limite Nord et les flancs Sud de l'Atlas saharien la limite Sud.

Le Nord Algérien renferme les principales ressources en eaux de surface et les infrastructures hydrauliques du pays. La partie Sud de l'Algérie est plutôt alimentée par ses ressources en eaux souterraines principalement de la nappe albienne.

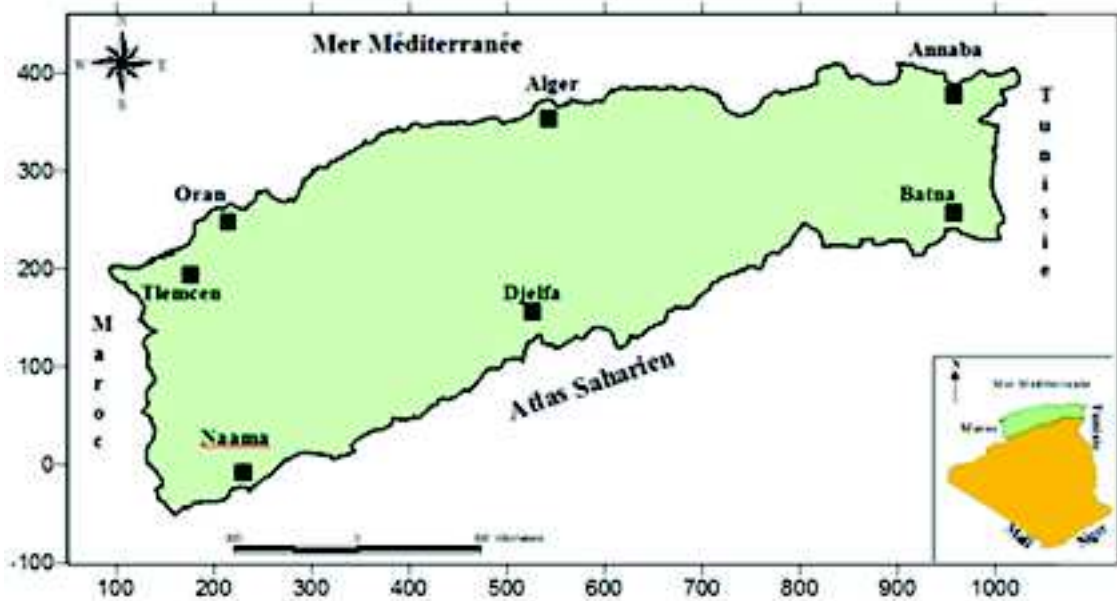


Figure 02 : Situation géographique de la zone d'étude.

3-1-2- Le relief

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et par l'action de l'érosion à une grande échelle (des milliers ou des millions d'années). Dans ce contexte l'Algérie est divisée en trois ensembles distincts.

Au Nord, l'Atlas tellien forme avec l'Atlas saharien, plus au Sud, deux ensembles de relief parallèles se rapprochant en allant vers l'Est, et entre lesquels s'intercalent de vastes plaines et hauts plateaux. Les deux Atlas tendent à se confondre dans l'Est de l'Algérie, où l'on retrouve les vastes chaînes montagneuses des Aurès (Batna, Khenchela, Oum-El-Bouaghi, Aïn M'lila, Souk-Ahras, Guelma, Biskra, etc.) et de la Nememcha (Tébessa) qui occupent la totalité de l'Est algérien. Le point le plus culminant est le mont Chéla à 2 328 mètres d'altitude.

· L'Atlas tellien

La bande tellienne large de 80 à 190 Km, s'étend sur environ 1200 Km de long couvrant ainsi la quasi-totalité de la zone littorale. Elle est formée de chaînes de montagnes qui se succèdent d'Ouest en est (l'Ouarsenis, le Chenoua, le Djurdjura, les Babors et les Bibans, ...). Au Nord, on rencontre le massif du Djurdjura qui culmine au pic de Lala Khadîdja (2308 m d'altitude) et plus à l'Est le massif cristallin de l'Edough. Au Sud, se dressent les monts du Titteri relayés par le massif de Guergour et les monts de Ferdjioua (Nord-Est de Sétif). Ces derniers sont prolongés par les monts de Constantine et de la Medjerda. L'Ouest tellien, se trouve dominé par les massifs du Dahra, Ouarsenis et Trara.

Entre tous ces massifs s'intercalent les plaines du Cheliff et de Sidi Bel Abbès à l'Ouest, la Mitidja au Centre et Seybousse à l'Est. Au Nord de l'Atlas tellien et en bordure de la mer s'étend le Sahel.

· les hauts plateaux

Entre les massifs telliens et l'Atlas saharien, s'étend un ensemble de plaines et de hauts plateaux offrant un paysage de steppes, d'une altitude variant entre 600 et 1000 m. À l'Ouest

du pays, elles s'étirent sur près de 500 Km sur une largeur de 100 à 200 Km. À l'Est, elles s'étendent sur une longueur de 200 Km environ avec un relief un peu plus élevé qu'à l'Ouest (entre 800 et 1000 m). Le climat caractérisant cette région est de type semi-aride.

Des étendues d'eau salée, qu'on appelle « les chotts », caractérisent cette partie. Le point le plus bas d'Algérie, atteint au Chott Melhir, descend à -40 m.



Figure 03 : principaux reliefs d'Algérie.

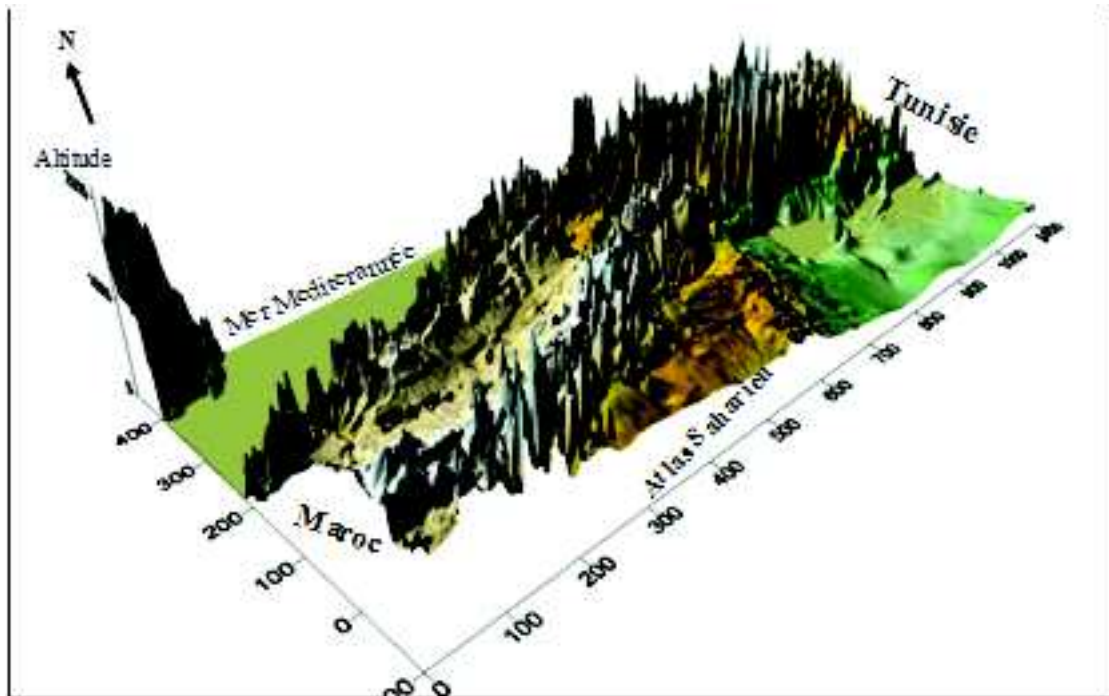


Figure 04 : Relief de la zone d'étude (source : ANRH).

3-1-3- Le climat

La zone d'étude connaît un climat très varié selon un axe Nord-Sud :

- un climat de type méditerranéen qui caractérise le Tell;
- un climat semi-aride domine les hauts plateaux. Il est plus froid et neigeux pendant l'hiver et plus chaud et sec pendant l'été.

Les régimes de pluies sont très irréguliers d'une région à l'autre, notamment entre le Nord et les hauts plateaux et entre l'Est et l'Ouest de la zone d'étude. Les précipitations en Algérie augmentent d'Ouest en Est et diminuent du Nord au Sud. Sur la période 1936/1937-2008/2009, les pluies moyennes annuelles sont d'environ 396mm à Oran, 653mm à Berrahal, 756mm à Bir Mourad Rais et 248mm à Djelfa (figure 05).

L'irrégularité des régimes de pluies est très prononcée à l'échelle saisonnière. Les quantités de pluies les plus importantes tombent entre les mois de novembre et février, alors que la saison d'été est la plus sèche. L'irrégularité est aussi bien marquée d'une année à l'autre.

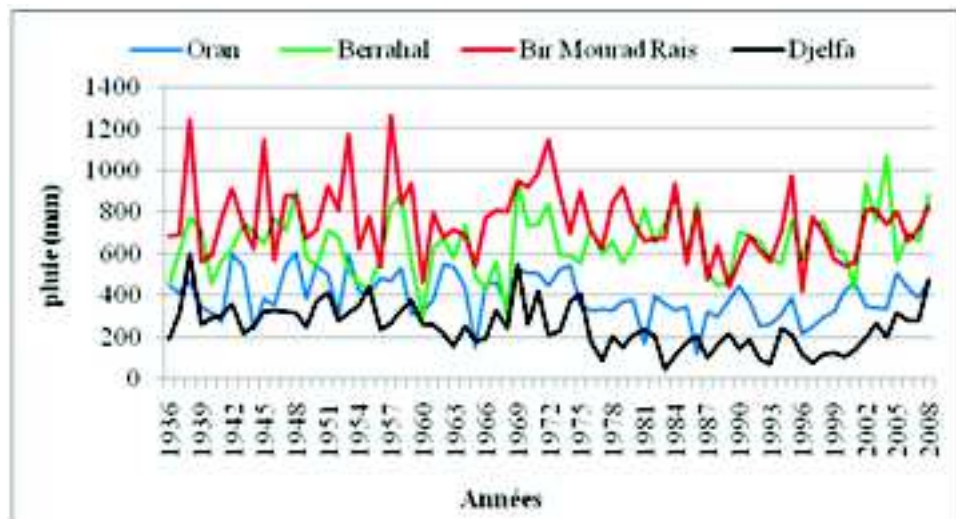


Figure 05 : Répartition des précipitations annuelles d'Est en Ouest et du Nord au Sud.

Les températures moyennes annuelles et mensuelles réagissent directement en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, déficit hygrométrique, pression barométrique, etc.). L'influence de la mer, comme facteur atténuant en hiver et rafraîchissant en été, est assez marquée sur les régions du littoral. De même, les contrastes saisonniers sont bien marqués entre l'hiver et l'été.

Les minima thermiques sont généralement atteints au mois de janvier alors que les maxima sont atteints en juillet et août. L'analyse des variations des températures annuelles, sur une série d'observations de 10 ans (1975 à 1985), montre que les stations du littoral sont caractérisées par des maxima compris entre 25°C et 30°C atteints en juillet. Dans les Aurès ainsi que dans les hauts plateaux de la région de Djelfa, la température estivale varie de 30°C à 38°C. Les minima sont enregistrés au mois de janvier et sont inférieurs à 10°C. Dans les montagnes de Kabylie, la température avoisine les 3°C voire -7°C en hiver. Les automnes sont plus chauds que les printemps. Oran, par exemple, a une moyenne de 18.8°C en octobre et de 16.7°C en mai (Touazi, 2001, in Assaba M., 2004).

Le Sirocco est un vent violent venant du Sud. Le plus souvent, il est chargé de particules de sable extrêmement ténues. Il se produit en toute saison, mais il est beaucoup plus fréquent pendant le printemps, l'été et l'automne que pendant l'hiver.

3-1-4- L'hydrographie

Au Nord de la ligne de crête de l'atlas, le Nord Algérien, couvre d'Ouest en Est, 4 grandes régions (bassins) hydrographiques :

- **Région 1** : Oranais-Chott Chergui (bassins hydrographiques 16, 04, 11, 08) ;
- **Région 2** : Chellif-Zahrez (bassins hydrographiques 01, 17 et la côte de Ténès : 02A) ;
- **Région 3** : Algérois-Soummam-Hodna (bassins hydrographiques 02B, 09, 05 et 15)
- **Région 4** : Constantinois-Seybouse-Mellegue (bassins hydrographiques 03, 07, 10, 14 et 12)

Ces 4 régions hydrographiques sont divisées en 16 bassins hydrographiques repartis en 2 catégories :

- **Les bassins tributaires de la Méditerranée** , au nombre de 11, des oueds drainant l'Atlas Tellien (les côtiers Algérois-02, côtiers Constantinois-03, et côtiers Oranais-04, le Tafna-16, la Macta-11, l'Isser-09, le Chellif-01, la Soummam-15, le Kebir Rhumel-10, le Seybouse-14 et la Medjerda-12).
- **Les bassins endoréiques** , au nombre de 4, des oueds dont les écoulements se font vers les chotts (chott Chergui-08, chott Zahrez-17, chott Hodna-05, les hauts plateaux Constantinois-07).

Le flanc Sud de l'Atlas fait partie de la région 5 : le bassin du Chott Melrhir-06 et le bassin du Sahara-13.

Au total l'Algérie couvre 17 grands bassins hydrographiques. Ce découpage fut initié lors de l'étude générale intitulée Plan National de l'Eau (PNE) lancée en 1993. Les superficies de ces bassins sont approximativement comme suit :

Tableau 01 : liste des 17 bassins hydrographiques de l'Algérie (source : ANRH).

Bassins	Nom	Superficie en Km ²
01	Chélif	43 750
02	Côtiers Algérois	11 958
03	Côtiers Constantinois	11 566
04	Côtiers Oranais	5 831
05	Chott Hodna	25 843
06	Chott Melrhir	68 750
07	Hauts plateaux Constantinois	9 578
08	Chott Chergui (hauts plateaux Oranais)	52 090
09	Isser	4 149
10	Kebir Rhumel	8 815
11	Macta	14 389
12	Medjerda	7 785
13	Sahara	2 087 995
14	Seybouse	6 475
15	Soummam	9 125
16	Tafna	7 245
17	Zahrez	9 141

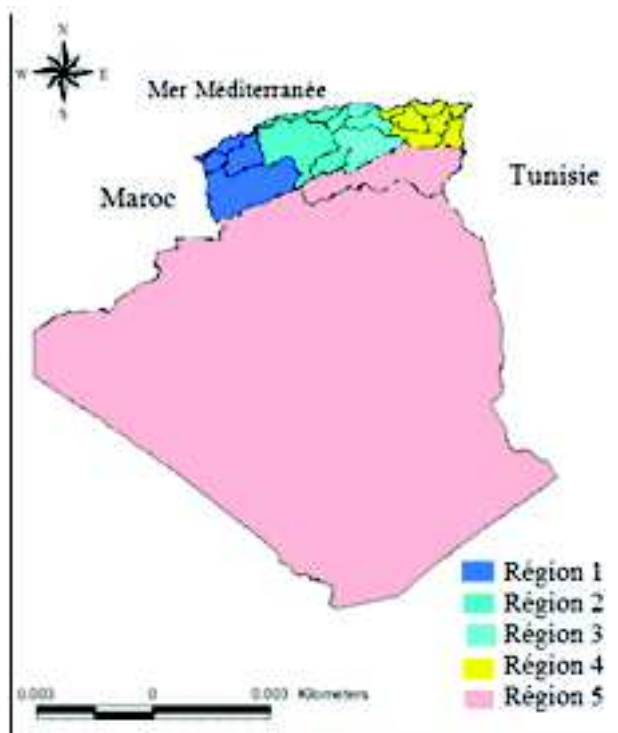


Figure 06 : Découpage de l'Algérie en régions hydrographiques (source : ANRH).



Figure 07 : Bassins versants du Nord de l'Algérie (source : ANRH).

3-1-5- L'hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, on retrouve généralement dans le Nord de l'Algérie des entités hydrogéologiques d'ampleur relativement limitée et en nombre important.

- a - Oranie - Chott Chergui

Les principaux aquifères de ce secteur sont :

- Plaine de Maghnia : cet aquifère se développe de part et d'autres de la frontière avec le Maroc et se compose de matériaux plio-quadernaire ;
- Monts de Telemcen : l'aquifère karstique et fournit des débits quelquefois important au niveau de certaines sources ;
- Plaine de Sidi Bel Abbès : la principale nappe est celle du plio-quadernaire. D'autres formations aquifères existent notamment dans les calcaires éocènes et dans les dolomies et calcaires des monts de Sidi Ali Ben Youb (Karstification) ;
- Djebel Mudjardjo-Brédéah : les calcaires du Mudjardjo sont karstifiés de façon importante et alimentent quelques sources significatives (Ras El Ain, Misserghin) et l'aquifère de Brédéah ;
- Chott Chergui : il existe de nombreuses formations potentiellement aquifères sur les plusieurs centaines de mètres de remplissage secondaire et tertiaire. Les aquifères les plus intéressants sont notamment les calcaires du Sénonien et les dolomies et calcaires du Jurassique supérieur ;
- Chott Gherbi ;
- Plateau de Saida : l'aquifère est principalement développé dans des calcaires karstifiés ;
- Plaine de Ghriss – mascara : trois principaux niveaux aquifères se rencontrent au niveau de la plaine de Mascara : nappe superficielle des alluvions quadernaires, la nappe des calcaires lacustres du moi-pliocène, et la nappe des calcaires et dolomies, du Jurassique ;
- Plateau de Mostaganem : cet aquifère se développe dans les sables et grès calabriens. Il alimente les aquifères voisins de la plaine de Bordjas et du synclinal de Bouguerat/vallée de la soif.
- b - Chellif – Zahrez
 - Plateau Sersou
 - Monts de Saida
 - Plaine de la Mina : cette plaine est limitée au Nord par la plaine alluvial du Chéllif, à l'Ouest par la plaine de Ghriss et à l'est par les calcaires de Zemmoura et au Sud par le plateau de Saida. On distingue deux nappes principales : la nappe phréatique quadernaire (puits) et la nappe des grès de l'Astien ;
 - Plaine de Ain Oussara : les formations gréseuses albiennes forment le principal aquifère de la région ;
 - Zahrez ;
 - Plateau de Ksar Chellala ;
 - Vallée du Chéllif : elle est délimitée en trois tronçons bien individualisés : plaine du haut-Chéllif, plaine du moyen Chéllif, plaine du bas-Chéllif. L'aquifère est localisé dans les alluvions grossières et dans la partie amont.
- c - Algérois – Hodna – Soummam
 - Plaine de la Mitidja : la plaine de la Mitidja est un bassin alluvial côtier où s'individualisent deux principaux ensembles aquifères : l'astien gréseux ou grésocalcaire et les alluvions quadernaires. Cet aquifère très exploité

possède probablement les plus importantes ressources du Nord de l'Algérie.

- Plaine alluviale de l'Oued Djer : cette plaine alluviale alimente au Sud-Est la plaine de la Mitidja.
- Nappes du Sahel : ces nappes s'étendent de part et d'autres d'Alger, le long du littoral. Elles siègent dans les dunes généralement consolidées ;
- Vallée de la Soummam : les alluvions quaternaires forment la nappe alluviale qui est en liaison directe avec l'oued Soummam qui draine la nappe en étiage et qui l'alimente lors des crues ou en hautes eaux, grâce à l'apport important de sources des reliefs (Issues des calcaires Jurassiques du Djurdjura)
- Plaine alluviale de Bejaïa ;
- Calcaire de Bejaïa ;
- Calcaire de Toudja.

· d - Constantinois – Seybouse - Mellegue

- Sebaou : cet aquifère est scindé en deux parties. Le bas- Sébaou forme une vallée d'alluvions quaternaires, structurée en un complexe de terrasses emboîtées. La nappe libre du Haut – Sébaou, épaisse d'une dizaine de mètres, s'étale sur une longueur de 50 Km (à proximité de Tizi Ouzou) et sur une largeur variant de 0.8 à 3 Km, de l'amont vers l'aval ;
- Chott El Hodna : dans la plaine du Hodna, deux nappes de grande étendue se superposent, la nappe phréatique et la nappe captive qui sont en communications en fonction de leur recharge et de la perméabilité du terrain intercalaire,
- Plaine de Tébessa Morsott : la plaine d'effondrement de Tébessa – Morsott abrite un vaste système aquifère constitué de plusieurs nappes en continuité hydraulique ;
- Plateau de Chrea ;
- Oued Djendjen ;
- Plaine de Ain M'lila ;
- Vallée de l'oued Safsaf ;
- Plaine de l'oued El Kébir : cet ensemble aquifère s'étend sur près de 96 Km², sa puissance varie de 12 à 44 m et peut être captive sous des niveaux argileux. Le sens d'écoulement des eaux souterraines est parallèle à celui de l'oued avec lequel elle est en liaison hydraulique ;
- Plaine de Gualma ;
- Plaine d'Annaba ;
- Plaine alluviale d'Isser ;
- Plaine de Biskra Tolga.

Les ressources en eau souterraines contenues dans les nappes du Nord du pays sont estimées à environ 2 milliards de m³/an. Ces nappes sont alimentées par les pluies : soit directement par l'infiltration directe, soit indirectement par l'infiltration des oueds.

L'alimentation en eau est donc conditionnée par la pluviométrie qui est caractérisée par une grande variabilité à la fois dans l'espace et dans le temps.

Tableau 02 : Évaluation des potentialités en eau et des prélèvements des principaux aquifères du Nord de l'Algérie.

Nappes	Potentialités (Hm ³ /an)
Plaine de Maghnia	15
Monts de Tlemcen	40
Plaine de Sidi Bel Abbès	30
Djbel Murdjadjou-Brédéah	12
Chott Chergui	54
Plateau Sersou	12
Plaine de la Mina	17
Plaine de Ain Oussera	27
Zahrez	50
Plateau Kser Chellala	14
Plaine de Bouira	15
Plaine côtière Bejaïa	35
Vallée de la Soummam	100
Plaine alluviale de l'oued Djer	20
Mitidja	328
Sahel	28
Boudouaou	12
Calcaire de Toudja	15
Calcaire de Bejaïa	17
Sebaou	53
Chott El Hodna	133
Synclinal de Dekhla	14
Plaine de Tebessa Morsot	18
Plateau de Cherea	18
Plaine de Biskra Tolga	60
Oued Nil	20
Oued Djendjen	10
Plaine de Ain M'lila	22
Vallée de l'oued Safsaf	12
Plaine de oued Kebir	15
Plaine de Gualma	17
Plaine d'Annaba	45
Plaine alluviale Isser	35
Chéllif	80
Oued M'zi	223
Chott Gharbi	40
Plateau de Saida	50
Plaine Ghriss	70
<i>Total</i>	<i>1776</i>

(Source : ministère des ressources en eau, 2007).

3-2- Données climatologiques utilisées

3-2-1- La pluviométrie

Pour notre travail, nous disposons de 105 stations pluviométriques réparties sur tout le Nord de l'Algérie. Les stations sont recueillies au niveau de l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques (ANRH). Le choix des stations repose sur les critères de qualité des données et de longueur des séries pluviométriques. La période de fonctionnement est différente d'une station à l'autre, pour cela nous avons choisi une période d'étude homogène de 1936/1937 à 2008/2009.

Nous disposons aussi de cinq séries pluviométriques journalières collectées au près de l'ONM (Oran, Chleff, Alger, Constantine, Annaba) qui coïncident avec la période d'étude 1936/1937- 2008/2009.

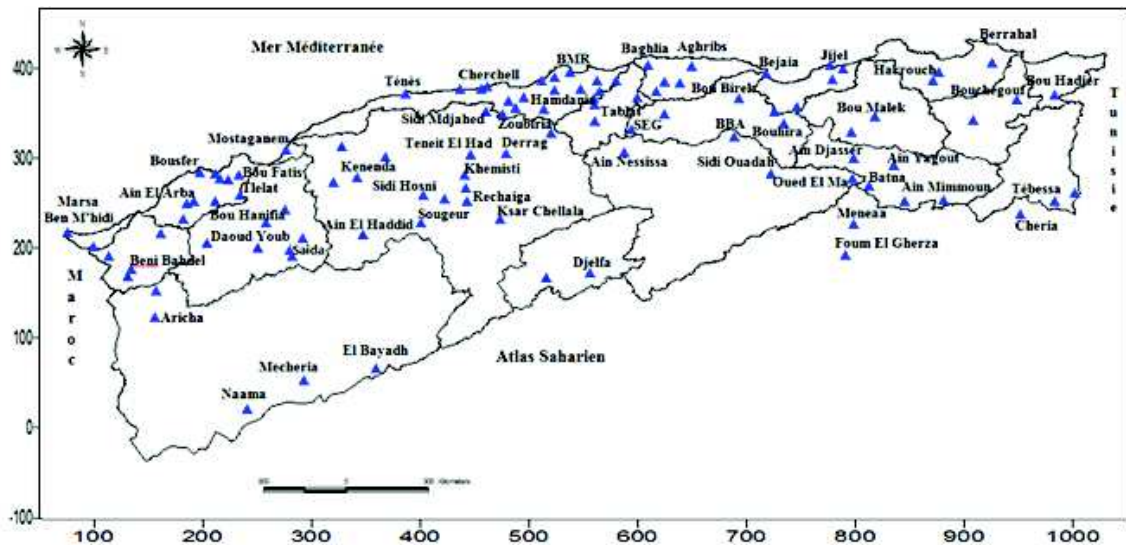


Figure 08 : Situation géographique des postes pluviométriques de la zone d'étude.

Les caractéristiques des 105 stations pluviométriques sont présentées dans le tableau suivant.

Code	Nom des stations	X	Y	Z	Année de début	Année de fin
010703	RECHAGA	434.5	224.5	830	1930	2008
010704	KSAR CHELLALA	465.0	211.8	850	1907	2008
010901	MEDHA	413.0	257.4	918	1913	2008
010901	SOUGUEUR	390.8	210.1	1140	1913	2008
011003	COLONE BOUCARA	452.0	251.9	800	1925	2008
011004	KHEMIST	452.0	265.5	951	1913	2008
011302	DERRAG	472.0	289.0	1150	1913	2008
011404	ZOUBINA	515.0	312.6	952	1910	2008
011905	TENET EL BAD	439.0	285.1	1150	1901	2008
011903	SIDI MEDJAHED	452.0	337.1	850	1916	2008
012503	SIDI HOENI	399.0	242.1	790	1930	2008
012905	AMM MOUSSA	356.0	256.2	140	1916	2008
012703	KENENDA FERME	330.0	263.6	590	1927	2008
012904	SIDI LAKHDAR	319.0	208.8	45	1967	2008
013004	AIN EL HADDAD	334.0	197.0	820	1913	2008
013404	SIDI APHEMED BEN AOUDA	508.0	255.0	130	1974	2008
020209	TENES	476.8	339.0	81	1936	2008
020306	MEURAD BGE	473.8	349.9	390	1909	2008
020312	CHERCHELL PHARE	454.4	348.0	16	1906	2008
020313	SIDI GHELS	448.0	348.8	17	1933	2008
020315	GOURAYA	429.3	343.8	34	1927	2008
020406	FOUKA VILLE	504.0	372.4	160	1949	2008
020509	BIRMANOREES ANHI	531.0	328.0	140	1951	2008
020611	MAHELEMA FERME	517.0	376.9	150	1949	2008
020601	DEUX BASSINS	554.0	353.3	890	1930	2008
020602	HAZZE BARRAGE	558.0	357.4	590	1905	2008
020607	PEPINIERE D ALGER	557.0	374.5	87	1921	2008
020608	BEJAJA	512.8	338.6	2	1926	2008
021014	OUED FERROUJ	448.0	334.8	400	1947	2008
021017	BOUNEDEFAA MF	480.1	341.3	270	1949	2008
021020	AMETUR EL AIN	488.1	352.8	120	1921	2008
021115	EL KANDANA	508.0	348.0	450	1940	2008
021209	BOUTARIK PEPINIERE	518.6	343.4	40	1921	2008
021403	LARBAA	541.0	349.0	100	1921	2008
021601	AGHERIBS	454.0	353.2	490	1922	2008
021705	LARBAA NATH IRATHEN	434.0	370.8	980	1909	2008
021801	BOUSSSEM	620.0	371.2	600	1939	2008
021901	BOGHI	612.0	322.0	200	1945	2008
022002	BAGHLIA VILL AGE	603.0	300.0	30	1947	2008
030204	AMOUCHAS	745.0	346.2	800	1914	2008
030205	AIN ROUA	723.0	400.0	1100	1924	2008
030301	JLEL SECTEUR	774.1	394.2	4	1878	2008
030302	TEKENA	776.0	371.9	700	1913	2008
030504	TABER	819.0	395.5	44	1913	2008
030606	EL HARROUCH	869.0	379.1	137	1908	2008
030909	RAMDANE DJAMEL	870.0	339.9	50	1954	2008
031302	BERBAH	924.0	403.1	80	1909	2008
031503	BOU HADJAR	984.0	349.8	300	1925	2008
040103	SIDI BOUDEMANE DRS	177.0	192.5	425	1949	2008
040104	MARSA BEN A HEDJ	184.0	120.9	1	1943	2008
040203	OUED BERNECHE	165.1	220.2	450	1943	2008
040301	BOUFER	180.4	273.3	84	1940	2008
040402	ES SENIA	200.6	266.1	85	1925	2008
040405	TAMBOURAH	195.0	259.9	189	1913	2008
040406	AIN EL ARBA	175.2	240.4	110	1940	2008
040415	HAMMAM BOU HADJAR	167.0	227.5	153	1913	2008
040518	ILLALAT BARRAGE	219.0	245.8	400	1910	2008
040602	ORAN PEPINIERE	196.4	271.3	82	1940	2008
040604	EL BRAYA	208.0	263.9	110	1924	2008
040518	BOUFATIS	218.0	262.0	80	1931	2008
040612	MOSTAGLANEM	266.4	293.4	141	1906	2008
050101	AIN NESSIBA	583.0	260.4	490	1924	2008
050905	BORDJ BOU ARRESDJ	653.0	210.0	922	1912	2008
051111	SIDI OUADAH	721.8	268.8	720	1979	2008
061203	OUED EL MA	798.0	265.8	1001	1919	2008
061304	MEVA	801.0	211.8	1051	1913	2008
061601	FOUM EL GHERZA	795.1	177.1	200	1947	2008
062301	CHERA	859.0	231.2	1030	1945	2008
070201	AIN DIASSER	798.0	129.1	861	1947	2008
070306	AIN YAGOUT	836.0	281.6	874	1913	2008
070316	BATNA	814.0	257.4	1040	1929	2008
070406	FOUM TOUB	849.0	252.0	1160	1915	2008
070704	AIN MIMOUN	886.4	243.6	1180	1923	2008
080102	EL ARICHA	115.8	409.2	1240	1908	2008
080201	EL AOUDA	126.0	418.1	1065	1909	2008
081202	EL BAYADH	344.8	343.8	1310	1872	2008
081401	ME CHEBIA	224.0	231.7	1158	1906	2008
081404	NAAMA	219.0	229.2	1160	1906	2008
090203	TABLAT	554.8	345.8	450	1924	2008
090302	BENI SLIMANE	557.0	322.0	400	1920	2008
090403	DEBBAHIA	594.0	253.2	400	1929	2008
090503	BOUHADDADA	574.6	372.3	400	1948	2008
100303	TADENASSET	796.0	218.0	845	1908	2008
100401	BOU MALEK	817.0	257.0	820	1908	2008
110201	SID ALI BEN YOUS	186.6	192.3	435	1913	2008
110801	DAOUD YOUS	233.6	183.4	680	1926	2008
111113	DJEBEL KAROUS	246.0	181.2	950	1970	2008
111130	SAIDA	266.8	174.4	780	1926	2008
111219	BOUCHIKHI	277.4	164.1	670	1941	2008
111413	TIZI	261.0	257.8	453	1941	2008
111503	BOU HANIFIA BGE	248.0	225.1	306	1940	2008
120301	TEBESSA	393.0	231.2	890	1913	2008
120404	EL KOUIF	1009.0	259.2	1100	1930	2008
140206	AIN MAKHLOUF	808.8	337.4	830	1927	2008
140505	BOUCHEGOUF	849.0	266.2	710	1947	2008
150101	SOUR EL GHOLZLANE	590.6	316.5	882	1900	2008
160204	EL ESNAM	420.4	335.5	435	1920	2008
160605	BOUHRA	773.0	238.0	1010	1911	2008
160703	BOU BIREK	489.6	334.5	500	1942	2008
160803	BENI OUASSINE	91.6	180.7	413	1923	2008
160803	BENI BARDEL BGE	115.0	184.6	464	1940	2008
160406	KHEMIS OULD MOUSSA	109.6	157.3	920	1923	2008
160702	BENSEKRANE	145.4	252.4	200	1913	2008
170102	CHABET	409.0	147.3	1200	1947	2008
170208	DZELFA	451.0	153.0	1140	1874	2008

Tableau 03 : caractéristiques géographiques et données disponibles des stations pluviométriques de la zone d'étude.

3-2-2- Les températures

Pour l'analyse des températures, nous avons choisi les stations dont la période de fonctionnement coïncide avec la période d'étude choisie. Ces stations sont au nombre de cinq : Alger, Annaba, Oran, Constantine et Chleff. Les données de température ont été recueillies au près de l'ONM.

Tableau 04 : Caractéristiques géographiques et données disponibles des stations météorologiques de la zone d'étude.

Nom	X	Y	Z	Année de début	Année de fin
Alger	36°41N	03°13E	25	1936	2008
Annaba	36°50N	07°49E	3	1936	2008
Oran	35°38N	00°36W	90	1936	2008
Constantine	36°17N	06°37E	694	1936	2008
Chleff	36°13N	01°20E	143	1936	2008

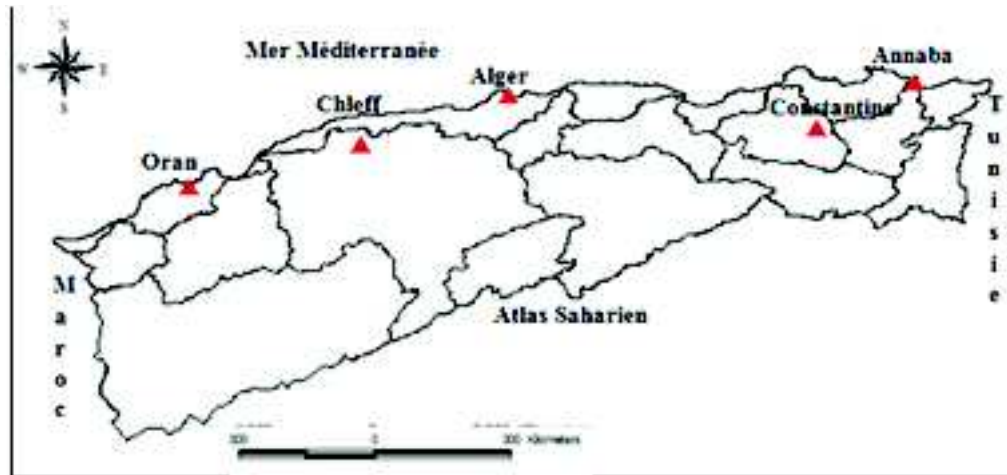


Figure 09 : Situation géographique des cinq stations météorologiques ONM.

Conclusion

La zone d'étude concerne le Nord de l'Algérie qui se trouve limitée par les parallèles 33° et 37°N et par les longitudes 2° Ouest et 10° Est. La surface totale de cette zone est d'environ 365 000 Km² et regroupe 15 bassins versants. Les précipitations moyennes varient selon un gradient Est-Ouest et Nord-Sud. Les températures varient considérablement en passant du littoral aux hauts plateaux, les minima sont enregistrés en janvier et les maxima en juillet.

Le réseau climatologique retenu regroupe 105 postes pluviométriques répartis sur l'ensemble de la zone d'étude et 5 stations météorologiques pour l'étude des températures sur la période d'étude 1936-1937/2008-2009.

Chapitre 4 : Méthodes utilisées

Introduction

Les méthodes retenues pour l'analyse du régime climatique sont les tests de rupture, l'indice pluviométrique standardisé et l'analyse en composantes principales. L'étude des précipitations à l'échelle journalière se fera par le biais des chaînes de Markov.

Ce qui suit, illustre dans les détails toutes les méthodes utilisées.

4.1 Tests de rupture

L'analyse statistique de séries chronologiques de données hydrométéorologiques est un des outils d'identification des variations climatiques. Cette analyse consiste généralement à la mise en œuvre et à l'interprétation de tests statistiques d'homogénéité des séries.

Les procédures concernées, dans ce cas, sont le test de corrélation sur les rangs (test de Kendall), le test de Pettitt, le test Buishand, la procédure bayésienne, de Lee et Heghinian, et la procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques de Hubert et Carbonnel.

4-1-1- Test de corrélation sur le rang (Kendall)

Le test de Kendall est basé sur le calcul du nombre P de paires (X_i, X_j) pour lequel $X_j > X_i$ ($j > i, i = 1, \dots, N-1$). Sous l'hypothèse nulle (H_0) de stationnarité de la série, la variable ω définie par :

$$\omega = \frac{4P}{N(N-1)} - 1$$

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

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

Pour un risque α de première espèce donné, l'acceptation de H_0 est définie par l'appartenance de ω à l'intervalle $[-U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_\omega, U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_\omega]$, $U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_\omega$ désignant la valeur de la variable normale réduite de probabilité de non dépassement $1-\alpha/2$.

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

4-1-2- Test de Pettitt

Le test de Pettitt (1979) est un test adapté à la détection d'une rupture au sein d'une série chronologique. Pettitt considère une séquence de variables aléatoires indépendantes de n valeurs $x_i, i=1, \dots, n$. La séquence est censée contenir un point de rupture à τ si les x_t pour $t=1, \dots, \tau$ ont une distribution commune $F_1(x)$, et les x_t pour $t=\tau+1, \dots, n$ ont une distribution commune $F_2(x)$ différente de $F_1(x)$. L'hypothèse nulle de « non-rupture », $H_0 : \tau=n$ contre l'hypothèse alternative de « rupture » $H_1 : 1 \leq \tau < n$, est testée au moyen d'un test statistique non paramétrique.

Aucune condition particulière n'est requise pour les formes fonctionnelles de F_1 et F_2 excepté la continuité.

Ce test est défini par la variable $U_{\tau, n}$ telle que :

Ce test est défini par la variable $U_{t,n}$ telle que :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n [\text{signe}(x_i) - x_j] \quad , \text{ Avec : } \begin{cases} \text{Signe}(x) = 1, \text{ si } x > 0 \\ \text{Signe}(x) = 0, \text{ si } x = 0 \\ \text{Signe}(x) = -1, \text{ si } x < 0 \end{cases}$$

Pour tester H_0 contre H_1 , Pettitt propose d'utiliser la variable :

$$K_n = \max[U_{t,n}]$$

On calcule ensuite p probabilité de dépassement de la valeur k :

$$p(K_n > k) = 2 \exp\left(-\frac{6k^2}{n^3 + n^2}\right)$$

Si p est inférieur à α , l'hypothèse H_0 de stationnarité (non-rupture) est rejetée au seuil α . Dans ce cas, la série présente une rupture au temps $t=\tau$ définissant K_n .

Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne.

Un classement qualitatif peut être effectué en tenant compte des valeurs de la probabilité associée à la statistique du test. Il est donné dans le tableau suivant.

Tableau 05 : Classement en fonction de la probabilité associée au test de Pettitt.

Probabilité associée	Classe
< 1%	Rupture très significative
Entre 1 et 5%	Rupture significative
Entre 5 et 20%	Rupture peu significative
> 20%	Série homogène

4-1-3- Test de Buishand

La statistique de Buishand est dérivée d'une formulation originale donnée par Garden(1969). La statistique de Garden utilisée pour un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu s'écrit :

$$G = \sum_{k=1}^{n-1} P_k \left\{ \frac{S_k}{\sigma_x} \right\}^2 \quad \text{avec} \quad S_k = \sum_{i=1}^k [(x_i) - \bar{x}]$$

P_k désigne la probabilité a priori que la rupture survienne juste après la $k^{\text{ème}}$ observation.

Cette formulation suppose que la variance σ_x^2 est connue. Si elle est inconnue, elle peut être remplacée par la variance de l'échantillon D_x^2 et si P_k est choisie uniforme, on obtient finalement la statistique U définie par :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{S_k}{D_x} \right)^2}{n(n+1)} \quad \text{avec} \quad D_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i) - \bar{x}]^2}{n}$$

Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982) à partir d'une méthode de Monte Carlo.

Pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série, la statistique U s'avère performante. La statistique U est une statistique robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité.

La construction d'une ellipse de contrôle (l'ellipse de bois) permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_j) . Cette méthode complète le test de la statistique U de Buishand. La variable S_k , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $k(n-k)^{-1}$, $k = 0, \dots, n$, sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (x_j) . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k sous l'hypothèse nulle.

4-1-4- Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian ne s'exprime pas comme un test statistique classique. Toutefois son interprétation vise à confirmer ou infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. Il s'agit d'une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées.

Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, n \end{cases}$$

Où les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 .

τ et δ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement de moyenne.

L'approche bayésienne est basée sur les distributions marginales a posteriori de τ et δ . L'étude est ici limitée à la distribution a posteriori de τ .

Si p , la densité de probabilité a priori de τ est uniforme, a posteriori elle est définie par :

$$p(\tau|\delta|x) \propto \left[\frac{n}{\tau(n-\tau)} \right]^{\frac{1}{2}} [R(\tau)]^{-\frac{n-2}{2}}, 0 \leq \tau \leq n-1, \text{ avec}$$

$$R(\tau) = \frac{[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}$$

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{x}_{n-\tau} = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=\tau+1}^n x_i$$

On sait que :

$$p(\delta|x) = \sum_{\tau=1}^{n-1} p(\delta|\tau, x) p(\tau|x)$$

La distribution conditionnelle a posteriori de δ par rapport à τ , est une distribution de Student de moyenne $\hat{\delta}_\tau = \bar{x}_{n-\tau} - \bar{x}_\tau$ et de variance $\sigma_\tau^2 = n H(\tau) / [(n-2)(n-\tau)]$ avec $v = n-2$ degrés de liberté. Sa fonction densité de probabilités s'écrit :

$$p(\delta|\tau, x) = \frac{v^{v/2} \Gamma((v+1)/2)}{\Gamma(v/2) \Gamma(v/2) (\sigma_\tau^2)^{v/2}} \frac{1}{(v + (\delta - \hat{\delta}_\tau)^2 / \sigma_\tau^2)^{(v+1)/2}}$$

La position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne sont définis par les modes des distributions a posteriori de τ et δ . Ces modes sont associés à des probabilités.

4-1-5- Procédure de segmentation de séries hydrométéorologique

La procédure de segmentation n'est pas, en toute rigueur, un test statistique. Cette méthode est adaptée à la recherche de multiples changements de moyenne dans la série. Elle a pour principe le découpage d'une série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s).

Toute série $X_j, j = 1, 2, \dots, n$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq n$, constitue un segment de la série initiale des (X_j) . Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale,

on définit : $i_k, k=1, 2, \dots, m$, le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment ; \bar{x}_k la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment ; et D_m l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée,

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

La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique D_m entre elle et la série est minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre, par application du test de Scheffé, la contrainte

selon laquelle les moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique. Elle est considérée comme un test de stationnarité, « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test.

4-2- Indice pluviométrique standardisé

Dans le cas de notre travail, l'indice pluviométrique standardisé est utilisé comme un indicateur de tendance ou de changement dans une série chronologique de données pluviométriques. Par sa classification, le SPI permet de caractériser le degré de sévérité de la sécheresse.

L'indice pluviométrique ou indice centré réduit pour une année donnée correspond au rapport de l'écart à la moyenne sur l'écart-type des hauteurs pluviométriques annuelles.

$$SPI_t = \frac{x_t - \bar{x}_t}{\sigma_t}$$

Où :

SPI_t : Indice pluviométrique de l'année ;

x_t : Hauteur de pluie précipitée au cours de l'année (mm) ;

\bar{x}_t : Moyenne interannuelle des hauteurs de pluie sur la période observée (mm),

σ_t : écart-type de la pluie moyenne interannuelle.

Tableau 06 : État de sécheresse hydrologique défini par le SPI (Guttman N.B., 1998).

Tableau 06 : État de sécheresse hydrologique défini par le SPI (Guttman N.B., 1998).

État de sécheresse	SPI
Extrêmement humide	$SPI \geq 2$
Très humide	$1.5 \leq SPI < 2$
Modérément humide	$1 \leq SPI < 1.5$
Près de la normale	$-1 < SPI < 1$
Modérément sèche	$-1.5 < SPI \leq -1$
Très sèche	$-2 < SPI \leq -1.5$
Extrêmement sèche	$SPI \leq -2$

4-3- Chaines de Markov

4-3-1- Concept des chaines de Markov

Une chaîne de Markov est un processus dont les probabilités de transitions sont des probabilités conditionnelles au passé. Le concept de chaîne de Markov est attribué principalement au mathématicien russe Andrej Andreevic Markov, vers 1907. La théorie a ensuite été développée, notamment par Hostinsky, von Mises, Fréchet, Bernstein, Romanovsky, Kolmogorov, Dynkin, (1965), et Kemeny et Snell (1976).

Des applications ont été réalisées dans de nombreux domaines, dont la biologie, la physique, la chimie, la musique, l'hydrographie, et l'occupation des sols.

Une chaîne de Markov met en relation des observations successives d'une même variable. Nous considérons ici une variable catégorielle X_t dont nous connaissons la valeur pour différentes périodes $t = 0, 1, 2, 3, \dots$. Cette variable comporte un nombre fini de catégories (ou valeurs) noté m . Par mesure de simplification, nous considérons que ces catégories sont numérotées et comprises dans l'ensemble $V = \{1, \dots, m\}$. Nous noterons E_1 l'ensemble des états de la chaîne de Markov d'ordre 1 (dans le cas de l'ordre 1, l'ensemble des états se confond avec l'ensemble des valeurs $X_t : E_1 = V$).

Une chaîne de Markov exprime l'état de la variable X_t à l'époque t en fonction d'un certain nombre d'observations passées de cette même variable. Formellement, connaissant la modalité prise par la variable aux périodes $t-1, t-2, \dots$, nous cherchons à calculer la probabilité qu'elle prenne chacune des m modalités possibles au temps t , c'est-à-dire :

$$P(X_t = i_0 \mid X_{t-1} = i_1, X_{t-2} = i_2, \dots)$$

Où : $i_0, i_1, i_2, \dots \in E_1$.

L'hypothèse de premier ordre dit que l'ensemble du passé de l'époque t est résumé par l'époque $t-1$. Nous avons alors :

$$P(X_t = j_0 \mid X_{t-1} = i_1, X_{t-2} = i_2, \dots) = P(X_t = j_0 \mid X_{t-1} = i_1) = q_{i_1 j_0}(t)$$

Où : $j_0, i_1, i_2, \dots \in E_1$.

Les probabilités $q_{i_1 j_0}(t)$, correspondant aux différentes valeurs possibles de j_0 et i_1 , sont résumées par la matrice $Q_{1(t-1, t)}$ de dimension $(m \times m)$, appelée matrice de transition de l'époque $t-1$ à l'époque t :

$$Q_{1(t-1, t)} = [q_{i_1 j_0}(t)] = \begin{pmatrix} q_{11}(t) & \dots & q_{1m}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{m1}(t) & \dots & q_{mm}(t) \end{pmatrix}$$

Chacune des lignes de la matrice est une loi de probabilité, ce qui implique que la somme des éléments de chaque ligne est égale à 1 :

$$i = Q_{1(t-1, t)}$$

Où i est un vecteur de 1 de taille m .

Cette matrice dépend du temps t , ce qui revient à dire qu'il n'y a pas une seule matrice, mais une infinité de matrices, une pour chaque époque.

4-3-2- Construction d'une chaîne de Markov (Berchtold A., 1998)

Pour bien comprendre les différentes étapes de constructions d'une chaîne de Markov, nous allons prendre un exemple à partir d'une série de données (l'exemple a été retenu pour sa simplicité et non pour son réalisme).

Nous considérons une variable représentant la situation météorologique à Genève. Cette variable prend trois modalités, soit pluvieux (P), couvert (C), et beau (B). Nous disposons de 20 observations successives de cette variable, soit :

P B C C C P C C B B B C P C C P C C C B

Dans une première étape, nous considérons une table de contingence décrivant la relation existant entre deux observations successives de cette variable.

Cette table notée N est de dimension (3 x 3), chaque ligne représentant la modalité prise par la variable à l'époque t, et chaque colonne la modalité prise par cette même variable à l'époque t+1. En remplissant la table à l'aide des 20 données à disposition, nous obtenons :

$$N = \begin{matrix} & \begin{matrix} P & C & B & Total \end{matrix} \\ \begin{matrix} P \\ C \\ B \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 3 & 6 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} 4 \\ 11 \\ 4 \end{matrix}$$

En divisant chaque chiffre par le total de la ligne correspondante, nous obtenons la matrice de transition homogène Q entre les époques t et t+1 :

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} P & C & B & Total \end{matrix} \\ \begin{matrix} P \\ C \\ B \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{3}{11} & \frac{6}{11} & \frac{2}{11} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.2727 & 0.5455 & 0.1818 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Nous pouvons vérifier que la somme de chaque ligne de la matrice de transition est bien égale à 1.

4-3-3- Probabilité des états futurs (Berchtold A., 1998)

Une chaîne de Markov permet de calculer la probabilité d'être dans un état donné après un nombre déterminé de périodes. Après une période la probabilité recherchée peut se lire directement sur la matrice de transition Q. si nous savons qu'à l'époque t nous nous trouvons dans l'état correspondant à la ligne i de la matrice, la probabilité de se trouver dans l'état j à l'époque t+1 est donnée par la probabilité d'indice (i,j) de la matrice. Par exemple, reprenons la matrice du temps à Genève donnée précédemment. Supposant qu'à l'époque 0 il fasse beau et que nous voulions déterminer la probabilité qu'il fasse encore beau après 1 période.

La probabilité recherchée se lit alors à l'intersection de la 3^{ème} ligne de la matrice (signifiant qu'il fait beau à l'époque t) et de la 3^{ème} colonne (signifiant qu'il fait beau à l'époque t+1), c'est-à-dire 0,5.

La probabilité qu'il fasse beau après deux périodes (et cela quel que soit le temps à la période 1) est un peu plus difficile à déterminer. En effet, comme représenté sur la figure dans le cas de notre exemple, il existe plusieurs chemins différents menant du beau temps de l'époque 0 au beau temps de l'époque 2, ceci en fonction du temps de la période 1.

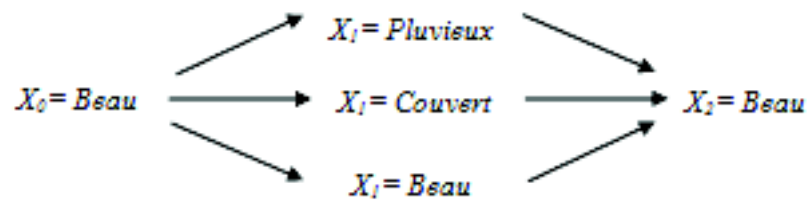


Figure 10 : Passage de l'époque 0 à l'époque 2.

Pour tenir compte des différents chemins possibles, nous devons écrire :

$$\begin{aligned}
 P(X_{t+2} = j | X_t = i) &= P(X_{t+2} = j, X_{t+1} = k | X_t = i) \\
 &= \sum_{k=1}^m P(X_{t+1} = k | X_t = i) \cdot P(X_{t+2} = j | X_{t+1} = k) \\
 &= \sum_{k=1}^m q_{i,k} q_{k,j} \\
 &= q_{i,1} q_{1,j} + q_{i,2} q_{2,j} + \dots + q_{i,m} q_{1,m} \\
 &= (\text{ligne } i \text{ de } Q) \cdot (\text{colonne } j \text{ de } Q) \\
 &= \text{élément } (i, j) \text{ de } Q^2 \\
 &= q_{i,j}^{(2)}
 \end{aligned}$$

Un calcul semblable nous permet de déterminer la probabilité de se trouver dans un état donné après 3 périodes en fonction de la modalité prise par la variable à l'époque 0 :

$$\begin{aligned}
 P(X_{t+3} = j | X_t = i) &= \sum_{s=1}^m P(X_{t+3} = j | X_{t+2} = s) \cdot P(X_{t+2} = s | X_t = i) \\
 &= \sum_{s=1}^m q_{i,s}^{(2)} q_{s,j} \\
 &= (\text{ligne } i \text{ de } Q^2) \cdot (\text{colonne } j \text{ de } Q) \\
 &= \text{élément } (i, j) \text{ de } Q^3 \\
 &= q_{i,j}^{(3)}
 \end{aligned}$$

De façon générale, nous obtenons l'équation de Chapman-Kolmogorov, soit :

$$\begin{aligned}
 P(X_{t+m+n} = j | X_t = i) &= \sum_{k=1}^m P(X_{t+m} = k | X_t = i) \cdot P(X_{t+m+n} = j | X_{t+m} = k) \\
 &= \sum_{k=1}^m q_{i,k}^{(m)} q_{k,j}^{(n)} \\
 &= q_{i,j}^{(m+n)}
 \end{aligned}$$

Cette équation dit que la probabilité après $m+n$ périodes de se trouver dans l'état correspondant à la colonne j de la matrice de transition Q , sachant qu'à l'époque de départ on se trouverait en ligne i , correspond à la probabilité d'indice (i, j) de la matrice Q élevée à la puissance $m+n$.

4-3-4- Propriétés des Chaînes de Markov et classification des états

Une chaîne de Markov est caractérisée par la distribution conditionnelle qui est aussi appelée **probabilité de transition** d'un pas du processus. La probabilité de transition pour deux, trois pas ou plus se déduit de la probabilité de transition d'un pas, et de la propriété de Markov. La loi de transition d'une chaîne de Markov à temps discret est donnée par une suite :

$\{P_n : n \in \{0, 1, 2, \dots\}\}$ où l'élément situé à l'intersection de la i ^{ème} ligne et de la j ^{ème} colonne de la matrice P_n est :

$$P_{ij}(n) = P[X_n = x_j | X_{n-1} = x_i]$$

Si la loi de transition ne dépend pas du temps, alors la chaîne de Markov est dite homogène et la matrice P constituée des probabilités de transition P_{ij} , est appelée la « **matrice de transition** » .

Une matrice de transition d'une chaîne de Markov est une matrice stochastique.

Une chaîne de Markov homogène à temps discret X est entièrement caractérisée par la donnée :

- de son espace d'états,
- de sa matrice de transition P ,

ainsi que sa distribution initiale $\vec{P}(0)$ dont la i ^{ème} composante est la probabilité que la chaîne démarre dans l'état x_i , c'est-à-dire que : $P_i(0) = P[X_0 = x_i]$

Les principales classes de propriétés des chaînes de Markov sont les suivantes :

- La réductibilité

Une chaîne de Markov est **irréductible** si elle ne compte qu'une **seule classe** . Dans le cas contraire, elle est réductible.

Une chaîne de Markov est irréductible si :

- son graphe représentatif est fortement connexe.
- si toutes ses paires d'états communiquent.
- La périodicité

La période d de l'état i d'une chaîne de Markov est égale au plus grand diviseur commun de tous les n pour lesquels $p_{ii}(n) > 0$.

L'état i est **périodique** lorsque $d > 1$ et **apériodique** lorsque $d = 1$.

Si $P_{ij} > 0$, l'état i est apériodique

- L'ergodicité

Une chaîne de Markov à temps discret est ergodique si la distribution de ses états converge vers une distribution stationnaire unique, qui est alors indépendante de la distribution initiale de la chaîne.

Les chaînes irréductibles et apériodiques sont ergodiques mais ce ne sont pas les seules.

En fait une chaîne est ergodique si :

- elle possède une seule classe persistante ;
- ses états persistants sont apériodiques.

4-4- Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes principales (ACP) fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles.

L'utilisation la plus commune de l'ACP est de fournir des données décrites par un grand nombre de variables quantitatives des représentations planes (et donc interprétables visuellement) aussi fidèles que possible. Pour cela, on projette ces données sur des plans factoriels, chaque plan étant défini par une paire de composantes principales prises parmi les premières composantes. De l'examen de ces projections, l'analyste tentera de retirer des informations sur la structure des données, par exemple :

- L'existence et la localisation d'observations "exceptionnelles", ou "aberrantes", c'est à dire très éloignées de l'ensemble des autres observations.
- L'existence de regroupements bien marqués (classes), suggérant l'existence de plusieurs sous-populations au sein de l'ensemble des observations.

Dans notre travail l'analyse en composantes principales est utilisée principalement pour l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations et des températures.

L'ACP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de (p) variables quantitatives pour (n) observations (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces observations et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population toute entière.

4-4-1- Tableau de données

Les observations de p $\{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_p\}$ variables et n individus $\{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$ sont rassemblées en un tableau rectangulaire X à n lignes et p colonnes :

$$X = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & \dots & v_j & \dots & v_p \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ip} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

On peut représenter chaque observation par le vecteur de ses mesures sur les p variables ce qui donne :

$$U_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{ij} \\ \vdots \\ x_{ip} \end{bmatrix}$$

De façon analogue, on peut représenter chaque variable par un vecteur de R_n , dont les composantes sont les valeurs de la variable pour les n observations :

$$V_j = \begin{bmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \vdots \\ x_{ij} \\ \vdots \\ x_{nj} \end{bmatrix}$$

Pour avoir une image de l'ensemble des observations, on se place dans un espace affine en choisissant comme origine un vecteur particulier de R_p , par exemple le vecteur dont toutes les coordonnées sont nulles. Alors, chaque observation sera représentée par un point dans cet espace. L'ensemble des points qui représentent les observations est appelé traditionnellement « **nuage des individus** ». En faisant de même dans R_n , chaque variable pourra être représentée par un point de l'espace affine correspondant. L'ensemble des points qui représentent les variables est appelé « **nuage des variables** ».

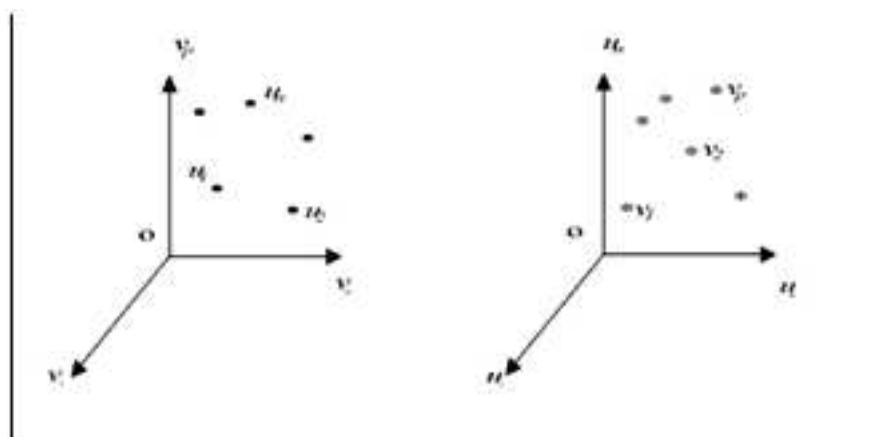


Figure 11 : Représentation graphique des n observations et p variables.

4-4-2- Projections des individus sur un sous-espace

Le principe est d'obtenir une représentation approchée du nuage des n individus dans un sous-espace de dimension faible. Le choix de projection s'effectue selon le critère suivant qui revient à déformer le moins possible les distances en projection : le sous-espace de dimension k recherché est tel que la moyenne des carrés des distances entre projections soit la plus grande possible.

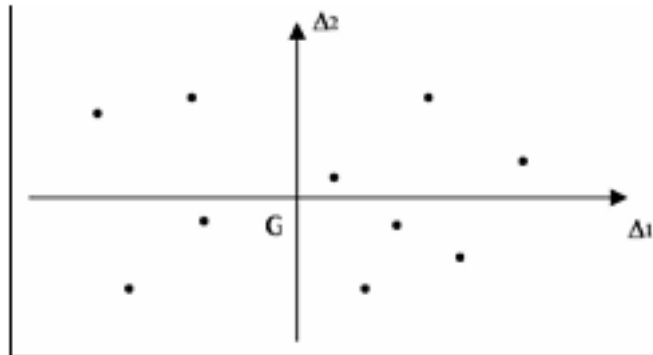


Figure 12 : Projections des individus sur un sous-espace.

- Matrice diagonale ou matrice des poids

Il est utile pour certaines applications de travailler avec des poids p_n éventuellement différents d'un individu à l'autre. Ces poids, qui sont des nombres positifs de somme 1 comparables à des fréquences, sont regroupés dans une matrice diagonale D de taille n :

$$D = \begin{bmatrix} p_1 & & & 0 \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_n \end{bmatrix}$$

- Matrice de variance-covariance et matrice de corrélation

On note $D_{1/s}$ la matrice diagonale des inverses des écarts-types :

$$D_{1/s} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1} & & & 0 \\ & \frac{1}{s_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{s_p} \end{bmatrix}$$

Et D_{1/s^2} la matrice diagonale des inverses des variances

La matrice regroupant tous les coefficients de corrélation linéaire entre les p variables prises deux à deux est notée R :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ \cdot & 1 & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ r_{p1} & & & 1 \end{bmatrix}$$

R est la matrice de variance-covariance des données centrées et réduites et résume la structure des dépendances linéaires entre p variables.

4-4-3- Interprétation et qualité des résultats d'une ACP

4-4-3-1- Interprétation des résultats d'une ACP

L'ACP construit de nouvelles variables, artificielles, et des représentations graphiques permettant de visualiser les relations entre variables, ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'individus et de groupes de variables.

La méthode la plus naturelle pour donner une signification à une composante principale c est de la relier aux variables initiales x^j en calculant les coefficients de corrélation linéaire et en s'intéressant aux plus forts coefficients en valeur absolue.

Pour un couple de composantes c^1 et c^2 on synthétise les corrélations sur une figure appelée

«**Cercle des corrélations**» où chaque variable x^j est repérée par un point d'abscisse $r(c^1; x^j)$ et d'ordonnée $r(c^2; x^j)$. Le cercle de corrélation est donc, dans l'espace des variables, le pendant exact de la projection des individus sur le premier plan principal.

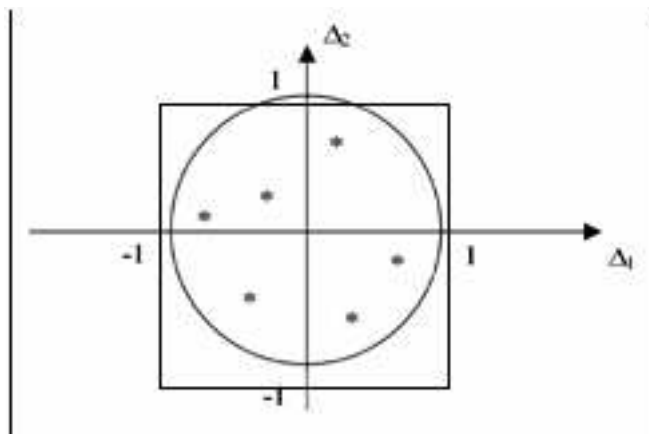


Figure 13 : Présentation d'un cercle de corrélations.

Dire que c^1 est très corrélée avec une variable x^j signifie que les individus ayant une forte coordonnée positive sur l'axe 1 sont caractérisés par une valeur de x^j nettement supérieure à la moyenne.

Inversement si les individus ne sont pas anonymes, ils aident à l'interprétation des axes principaux et des composantes principales.

Il est très utile aussi de calculer pour chaque axe la contribution apportée par les divers individus à cet axe. Considérons la $k^{\text{ième}}$ composante c_k , soit c_{ki} la valeur de cette composante pour le $i^{\text{ième}}$ individu. On a :

$$\sum_{i=1}^n p_i c_{ki}^2 = \lambda_k$$

La contribution de l'individu i à la composante c_k est définie par :

$$\frac{p_i c_{ki}^2}{\lambda_k}$$

La considération des contributions, quand elles ne sont pas excessives, aide à l'interprétation des axes.

Pour les premières composantes il n'est pas souhaitable qu'un individu ait une contribution excessive car cela serait un facteur d'instabilité, le fait de retirer cet individu modifiant profondément le résultat de l'analyse.

Lorsque toutes les variables sont corrélées positivement entre elles, la première composante principale définit un « facteur de taille ».

La deuxième composante principale différencie alors des individus de « taille » semblable : on l'appelle facteur de « forme ».

4-4-3-2- Qualité des représentations sur les plans principaux

Le but de l'ACP étant d'obtenir une représentation des individus dans un espace de dimension plus faible que p , il serait donc intéressant d'apprécier la perte d'information subie et de savoir combien de facteurs retenir.

Le critère habituellement utilisé est celui du pourcentage d'inertie totale expliquée.

On mesure la qualité de F_k par :

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k}{I_D} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p}$$

Si par exemple $\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{I_D} = 0,9$ on conçoit clairement que le nuage de points est presque aplati

sur un sous-espace à deux dimensions et qu'une représentation du nuage dans le plan des deux premiers axes principaux sera très satisfaisante.

L'appréciation du pourcentage d'inertie doit faire intervenir le nombre de variables initiales : un pourcentage de 10% n'a pas le même intérêt sur un tableau de 20 variables et sur un tableau de 100 variables.

4-4-4- Nombres d'axe à retenir

Le choix du nombre d'axes à retenir est un point essentiel, du fait que l'ACP consiste à réduire la dimension de l'espace des individus.

- Critères théoriques

Ceux-ci consistent à déterminer si les valeurs propres sont significativement différentes entre elles à partir d'un certain rang : si la réponse est négative on conserve les premières valeurs propres. On fait pour cela l'hypothèse que les n individus proviennent d'un tirage aléatoire dans une population gaussienne où . Si cela est vrai la moyenne arithmétique a des k - p dernières valeurs propres et leur moyenne géométrique g doivent être peu différentes ; on admet que :

$$c = \left(n - \frac{2p + 11}{6} \right) (p - k) \ln \frac{a}{g}$$

Suit alors une loi du χ^2 de degré de liberté $\frac{(p - k + 2)(p - k - 1)}{2}$; l'hypothèse d'égalité des $<k$ - p valeurs propres sera rejetée si c est trop grande.

k - p valeurs propres sera rejetée si c est trop grande.

L'inconvénient de ces propriétés est qu'elles ne sont utilisables que pour des matrices de variance. Elles ne s'appliquent absolument pas pour les matrices de corrélation ce qui est le cas le plus fréquent en pratique.

Critères empiriques

Ce sont en réalité les seuls applicables, le critère de Kaiser est le plus connu. Lorsqu'on travaille sur des données centrées réduites on retient les composantes principales correspondant à des valeurs propres supérieures à 1 : en effet les composantes principales c étant des combinaisons linéaires des z^j de variance maximale λ , seules présentent un intérêt des composantes de variance supérieure à celle des variables initiales.

On préconise également de détecter sur le diagramme des valeurs propres à l'existence d'un coude ce qui n'est pas toujours aisé en pratique. Le scree-test de Cattell en est la version analytique. On calcule les différences premières :

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \varepsilon_1 \quad \text{et} \quad \lambda_2 - \lambda_3 = \varepsilon_2 \dots$$

Puis les différences secondes :

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \delta_1 \quad \text{et} \quad \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \delta_2$$

On retient alors les valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \lambda_{k+1}$ telles que $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$ soient tous positifs.

Il reste néanmoins l'obligation de ne retenir que les composantes interprétables et l'usage des corrélations avec les variables actives et supplémentaires joue ici un grand rôle.

Conclusion

La méthodologie adoptée est bien définie, les tests statistiques sont utilisés pour la détection d'une rupture au sein des séries de données (pluie et température). L'indice pluviométrique va déterminer les années ou périodes sèches et humides ainsi que leur degré de sévérité et l'analyse en composante principale va caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des températures sur tout le Nord Algérien durant la période 1936/1937-2008/2009.

chapitre 5 : Critique des données et variabilité des précipitations

Introduction

Nous abordons ce chapitre par une présentation des données ainsi que les méthodes utilisées pour le comblement et l'homogénéisation de ces données.

Une étude générale est consacrée pour l'analyse de la variabilité du régime pluviométrique à l'échelle spatiale à travers le coefficient de variation, à l'échelle temporelle par la persistance des années sèches.

5-1- Critique des données

5-1-1- Comblement des données manquantes

Les données pluviométriques collectées auprès de l'ANRH, sont pratiquement complètes sur les trente dernières années (à partir de 1970). Ce sont les années d'avant qui présentent plus de lacunes.

La période d'étude choisie étant de 1936/1937-2008/2009 -par manque de données pluviométriques dans quelques régions de la zone d'étude- certaines séries ont été comblées sur plusieurs années avant 1970. La période 1962-1966 est souvent lacunaire pour beaucoup de stations.

Les données de températures collectées auprès de l'ONM ne présentent pas beaucoup de lacunes sur la période 1936/1937-2008/2009. De ce fait, les données manquantes ont été facilement comblées par la moyenne interannuelle.

Le comblement de lacunes des pluies mensuelles a été effectué par le biais de la moyenne mensuelle interannuelle, la corrélation avec les stations voisines (régression linéaire), et par l'analyse en composantes principales.

- Comblement par la moyenne interannuelle

Le comblement par la moyenne mensuelle interannuelle, n'est valable que lorsque l'année considérée présente une ou deux valeurs mensuelles manquantes.

- Comblement de lacunes par régression linéaire

Le comblement par régression linéaire consiste à prendre deux stations proches. La station utilisée pour le comblement des données manquantes ne doit pas présenter de lacunes pendant la période lacunaire de la station concernée.

- Comblement de lacunes par l'analyse en composantes principales

Les deux méthodes de comblement présentées précédemment ne sont pas tout le temps valables, surtout pour les stations qui présentent des lacunes sur plusieurs années. Dans ce cas, on utilise la méthode de comblement par l'ACP. L'objectif de cette méthode est de combler des lacunes dans une matrice de données. Les variables sont disposées suivant des colonnes et représentent dans notre cas le nombre de mois « nm ». Les lignes représentent le nombre d'observations « no ». La matrice de données se présente comme suit :

$$[X] = \begin{bmatrix} x(1,1) & \text{inconnu} & \dots & x(1,nn) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & \text{inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(no,1) & \text{inconnu(lac)} & \dots & x(no,nn) \end{bmatrix}$$

5-1-2- Homogénéité et indépendance des séries pluviométriques

a- Test de wilcoxon

Pour tester l'homogénéité de deux échantillons indépendants issus d'une même population on utilise les deux statistiques équivalentes de Mann-Whitney et Wilcoxon.

Pour cela, nous avons soumis toutes les données au test de wilcoxon dont le principe consiste à ranger dans l'ordre croissant l'ensemble des observations mélangées des deux échantillons, à leur affecter un rang et à calculer séparément la somme des rangs des observations provenant de chacun des deux échantillons, notées W_x et W_y .

Le test repose sur l'hypothèse suivante :

$$H_0: P_x = P_y$$

$$H_1: P_x < P_y$$

P_x : la probabilité de l'échantillon $X(x_1, \dots, x_n)$

P_y : la probabilité de l'échantillon $Y(y_1, \dots, y_n)$

La statistique W de Wilcoxon est la somme des rangs du premier échantillon (W_x).

Si W_x est inférieur à la valeur critique l'hypothèse nulle est alors acceptée.

Les résultats du test de Wilcoxon montrent que plusieurs séries pluviométriques sont hétérogènes et la majorité de ces stations sont localisées (concentrées) à l'ouest de la zone d'étude. De ce fait une deuxième vérification des séries pluviométriques est établie par la méthode du double cumul, afin de vérifier si l'hétérogénéité est due à une erreur systématique ou à un changement climatique.

b- La méthode du double cumul

Lorsqu'une station présente une erreur systématique (erreur d'appareillage, changement d'observateur...), la méthode du double cumul est utilisée pour vérifier l'homogénéité de cette station. La méthode repose sur le principe qu'un changement dû à des causes météorologiques ne changera pas la pente de la courbe puisque les stations voisines seront affectées de la même façon.

Cette méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations. L'une des stations (station X) est la station de base ou station de référence,

supposée correcte (homogène). L'autre station (station Y) est la station à contrôler. Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisi (année, saison, mois, décennie), non pas les valeurs observées, mais leur cumul. La méthode est d'un concept extrêmement simple, puisqu'il suffit de tracer un graphe des quantités :

$$X(t) = \sum_{i=1}^t x(i) \text{ et } Y(t) = \sum_{i=1}^t y(i)$$

La méthode du double cumul a permis d'homogénéiser, 5 séries pluviométriques, qui présentent une erreur systématique ; pépinière d'Alger (020607) et Boubirek (150703) au centre, Oued El Ma (051203), Bouhira (150608) et El Kouif (120504) à l'est.

c- Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz

Dans la liste des tests non paramétriques, le test de Wald-Wolfowitz est le plus efficace comme test d'indépendance (Ondo J.C. et al, 1997).

Pour son application, on considère la variable R donnée par :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n.$$

Pour n strictement supérieur à 40, sous l'hypothèse nulle d'indépendance, R suit approximativement une distribution normale de moyenne E(R) et de variance Var(R).

La statistique du test est alors :

$$Z = \frac{R - E(R)}{\sqrt{Var(R)}} \sim N(0,1)$$

Au niveau de signification α , rejeter H_0 si : $|Z_{obs}| > z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$

où : $z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$ est le quantile d'ordre $(1 - \frac{\alpha}{2})$ de la loi $N(0,1)$.

Les 105 échantillons soumis au test de Wald-Wolfowitz montrent qu'ils sont tous indépendants à l'exception de 07 stations; Sidi Bou Djnane, Marsa Ben M'hidi et Ben Sekrane à l'ouest, El Hamdania, Aghribs, Ain Nessissa et El Asnam au centre.

5-2- Analyse de la variabilité de la pluviométrie

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

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

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

5-2-1- Variabilité interannuelle de la pluviométrie

5-2-1-1- Variabilité des cumuls annuels

Le degré de variabilité est souvent mesuré par le coefficient de variation. L'utilisation de cette notion statistique nécessite beaucoup de prudence, notamment dans les régions à faible pluviosité, ce qui est le cas d'une grande partie du domaine étudié. En effet, l'écart-type est très sensible aux valeurs extrêmes de la distribution. La comparaison entre des stations de moyennes très différentes donne des résultats pouvant prêter à des interprétations erronées.

Les valeurs extrêmes influencent l'écart-type et le coefficient de variation qui augmente dans le sens inverse de la moyenne. La carte des coefficients de variation annuelle des pluies (figure 16) est ainsi l'image inversée de la pluviométrie moyenne. Elle reflète la distribution spatiale de la pluviométrie moyenne : les régions à forte pluviométrie (la partie Est du côtier Algérois : la Kabylie et le côtier Constantinois) sont dotées d'une faible variabilité (les coefficients de variation sont faibles, autour de 20%), alors que les régions à faible pluviométrie (la région ouest et les hauts plateaux) sont caractérisées par des coefficients très élevés (autour de 40%).

Pour présenter le degré de variabilité réel de plusieurs stations, nous avons étudié la relation entre l'écart-type (E) et la moyenne (M), puis nous avons quantifié cette relation par une droite de régression linéaire en utilisant les données annuelles sur toute la période d'étude des 105 stations.

L'équation de cette droite est :

$$E = 0,2077M + 37,308$$

Figure 14 : variation de l'écart-type en fonction de la moyenne.

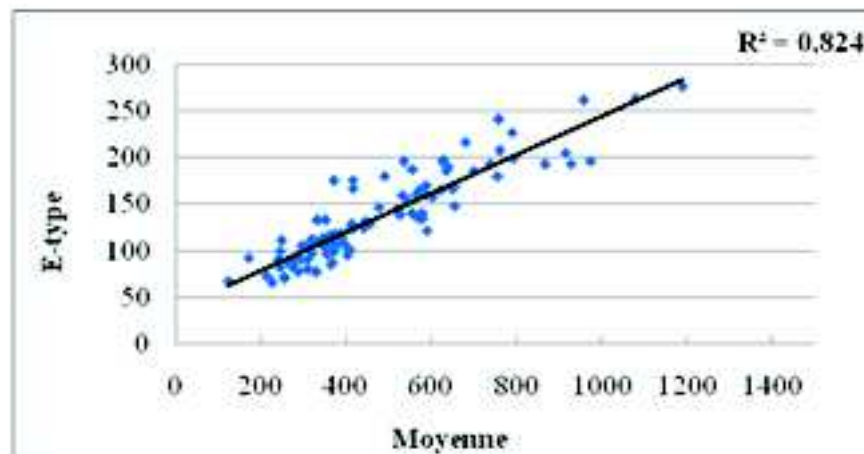


Figure 14 : variation de l'écart-type en fonction de la moyenne.

Cette relation explique 82% de la variance totale. Elle décrit le degré de variabilité dans la région pour une pluviométrie moyenne donnée.

La carte des résidus (différence entre les valeurs de l'écart type estimées par le modèle linéaire et les valeurs réelles) (figure 17) en pourcentage de la moyenne met en évidence différentes régions :

- Une zone de forte variabilité localisée dans la région littorale Ouest (entre -10% et 6%)
- Une zone de faible variabilité qui couvre la région centre, Est et une partie de l'Ouest de la zone d'étude
- Le sud de la région (Djelfa) est mal pris en compte par le modèle linéaire avec de très fortes valeurs de résidus qui indiquent que le modèle linéaire ne s'applique pas aux faibles pluviométries. Par ailleurs le réseau de stations de cette zone est très

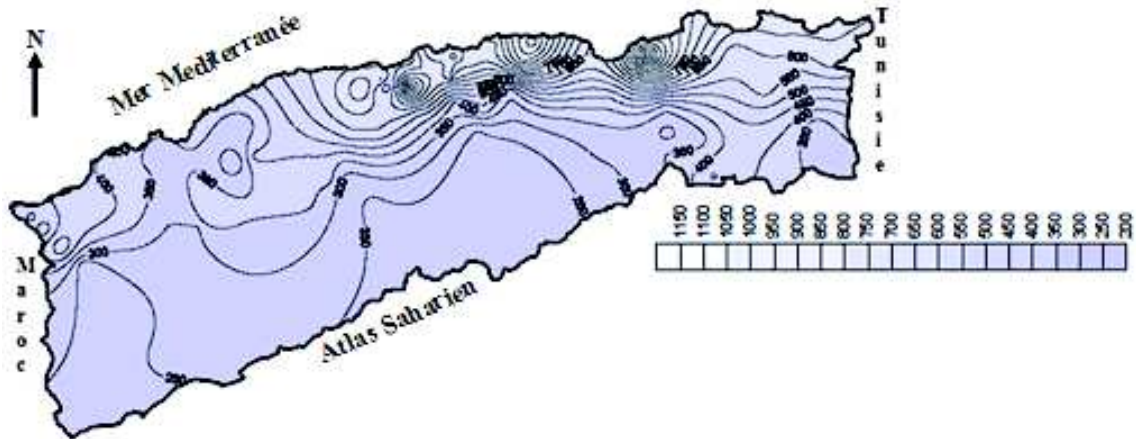


Figure 15 : variabilité des pluies annuelles dans la zone d'étude.

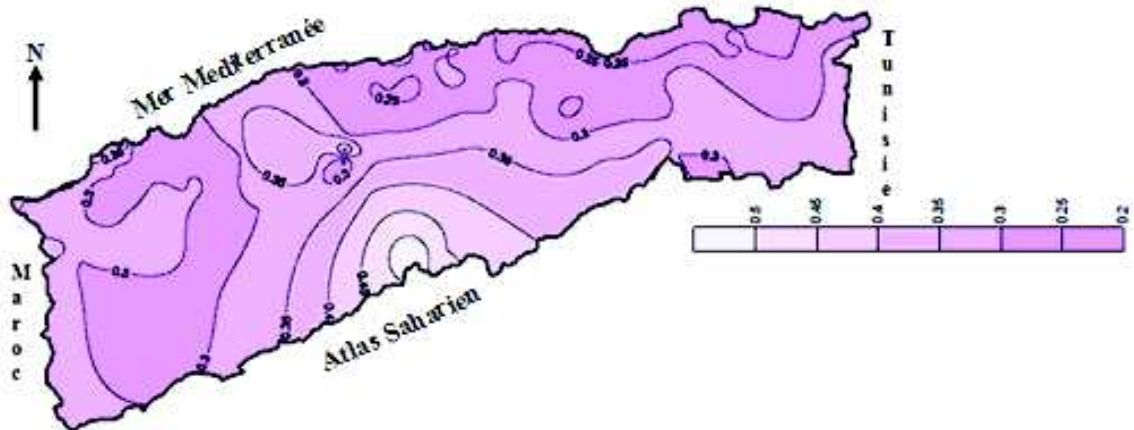


Figure 16 : Coefficient de variation des pluies annuelles.

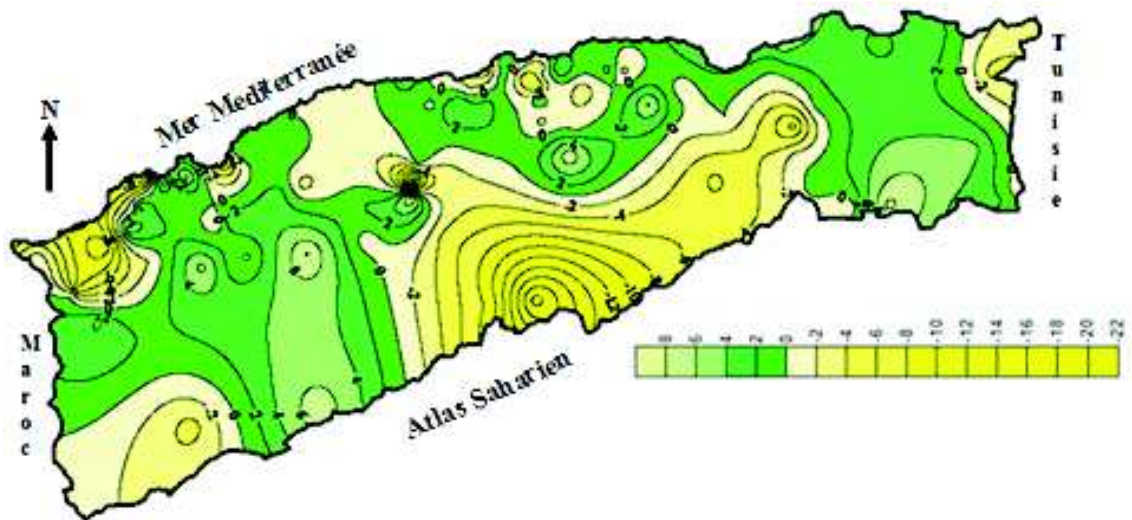


Figure 17 : Variation des pourcentages de résidus annuels.

5-2-1-2- Variabilité des cumuls saisonniers

A l'échelle saisonnière, la répartition spatiale de la variabilité change sensiblement d'une saison à l'autre.

La forte variabilité des saisons intermédiaires, automne et printemps, constitue une forte contrainte pour les activités agricoles et pose le problème de la durée de la saison pluvieuse. (Ces deux saisons étant les plus importantes du cycle végétatif, levée des céréales ou épiaison, qui conditionnent le succès de la moisson).

En toute saison, l'Est, région la plus arrosée, connaît la plus faible variabilité. Cette variabilité augmente lorsqu'on va vers le sud et le nord ouest. Les valeurs enregistrées dans le sud du domaine d'étude sont purement théoriques en raison des faibles totaux pluviométriques et de la faible densité du réseau de stations.

Les coefficients de variation des pluies saisonnières, indiquent une variation (ou variabilité) de 0.35 à 1 en automne et 0.30 à 0.65 en hiver. Cette variabilité est très importante sur le côtier Oranais et les hauts plateaux Oranais. Le printemps ne suit pas cette même variabilité, par contre nous constatons que les coefficients de variations sont très importants sur le côtier Oranais (0.75). L'été est caractérisé par une très forte variabilité pluviométrique. Les coefficients de variation varient entre 0,6 et 1,7. Cette variabilité est importante sur les bassins côtiers, et l'ouest de la zone d'étude.

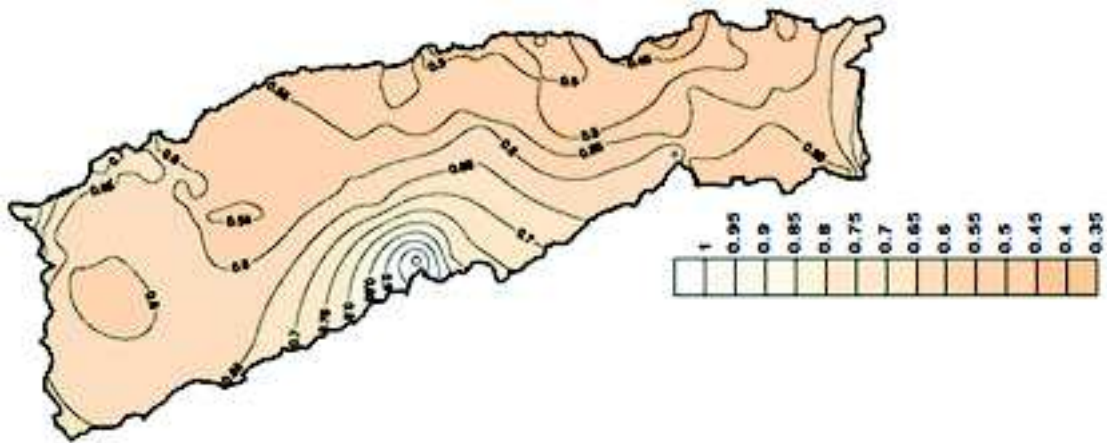


Figure 18 : coefficients de variation de l'automne.

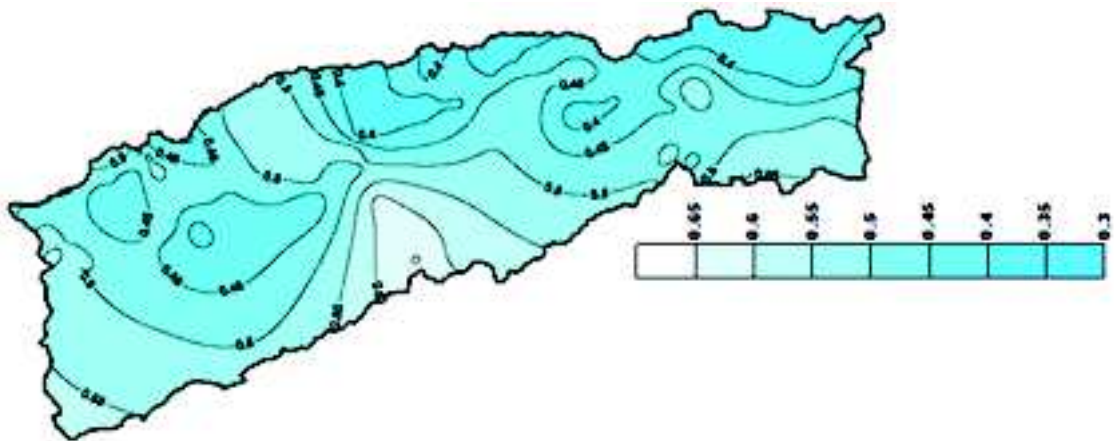


Figure 19 : coefficients de variation de l'hiver, figure :coefficient de variation automne.

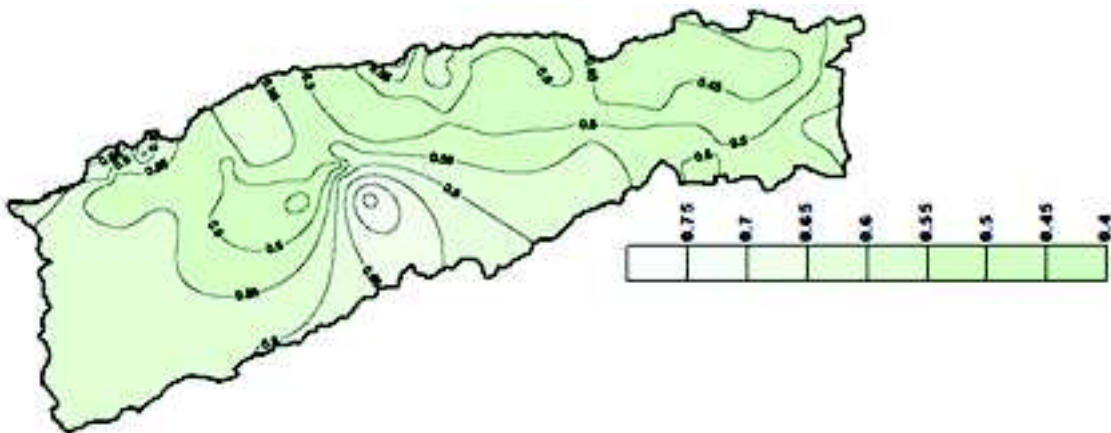


Figure 20 : coefficient de variation du printemps.

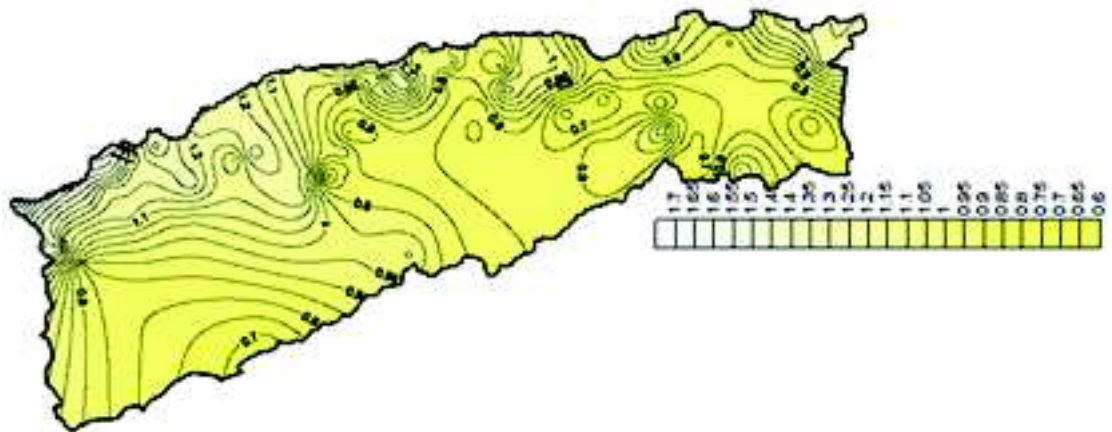


Figure 21 : coefficient de variation de l'été.

5-2-2- Analyse de la persistance interannuelle des anomalies

La variabilité des précipitations, qu'elle soit interannuelle ou intermensuelle, fait partie du comportement normal de la pluviométrie, notamment, dans la zone méditerranéenne. Cependant, le problème qui se pose est la persistance des anomalies négatives, c'est-à-dire le risque qu'une année sèche soit suivie par une ou plusieurs années déficitaires, avec un très fort impact économique de ces anomalies groupées. De ce fait, l'étude de l'organisation dans le temps des séries pluviométriques est très importante. Nous allons considérer deux aspects :

- la persistance interannuelle des anomalies ;
- la persistance des années sèches.

5-2-2-1- Analyse de la persistance interannuelle des anomalies

La façon la plus simple et la plus immédiate d'évaluer l'indépendance sérielle, adoptée dans de nombreux ouvrages d'hydrologie statistique, consiste à calculer le coefficient d'auto-corrélation d'ordre un de la série pluviométrique, qui est donné aussi par l'auto-corrélogramme. En effet on suppose qu'il existe des dépendances significatives entre les termes successifs d'une série non aléatoire.

Le coefficient d'auto-corrélation d'ordre 1 est donné par l'équation suivante :

$$r_1 = \frac{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)(x_{i-1} - m_x) \right)}{V_x}$$

Nous avons déterminé le coefficient d'auto-corrélation des 105 séries pluviométriques de la zone d'étude au seuil de signification 95%, par le biais du logiciel Khronostat. Les valeurs du coefficient d'auto-corrélation appartenant à l'intervalle de confiance de l'autocorrélogramme [-0,23 ; 0,23] indiquent une indépendance entre les années successives dans la série de données pluviométriques. Les valeurs dépassant cet intervalle indiquent, quant à elles, le degré de dépendance des années successives au sein d'une même série de données.

L'histogramme des fréquences des coefficients d'auto-corrélation (figure 22) montre bien qu'il existe une indépendance dans le temps pour la plupart des stations pluviométriques, avec des fréquences assez élevées. La dépendance sérielle est moins importante, et sa fréquence aussi.

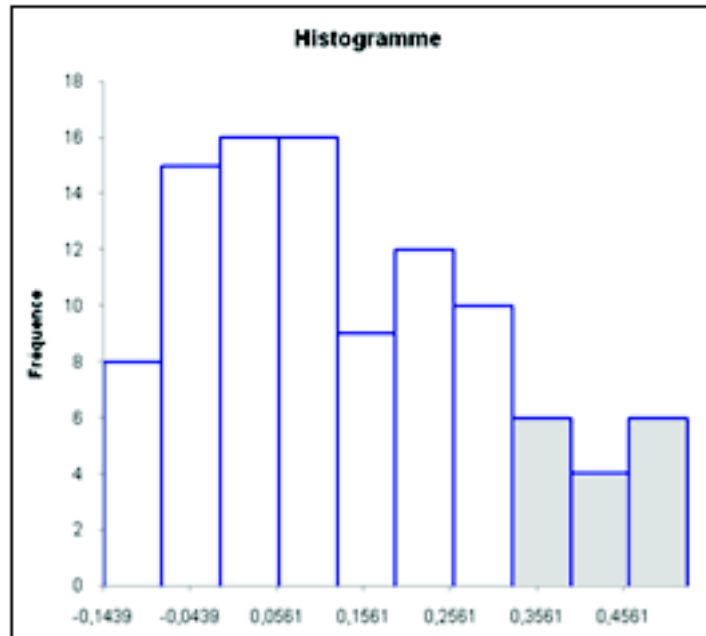


Figure 22 : histogramme des fréquences des coefficients d'auto-corrélation.

D'après les résultats, nous constatons que les valeurs obtenues sont faibles dans la plupart des cas. 18% seulement des stations ont enregistré des coefficients significatifs au seuil de 5%.

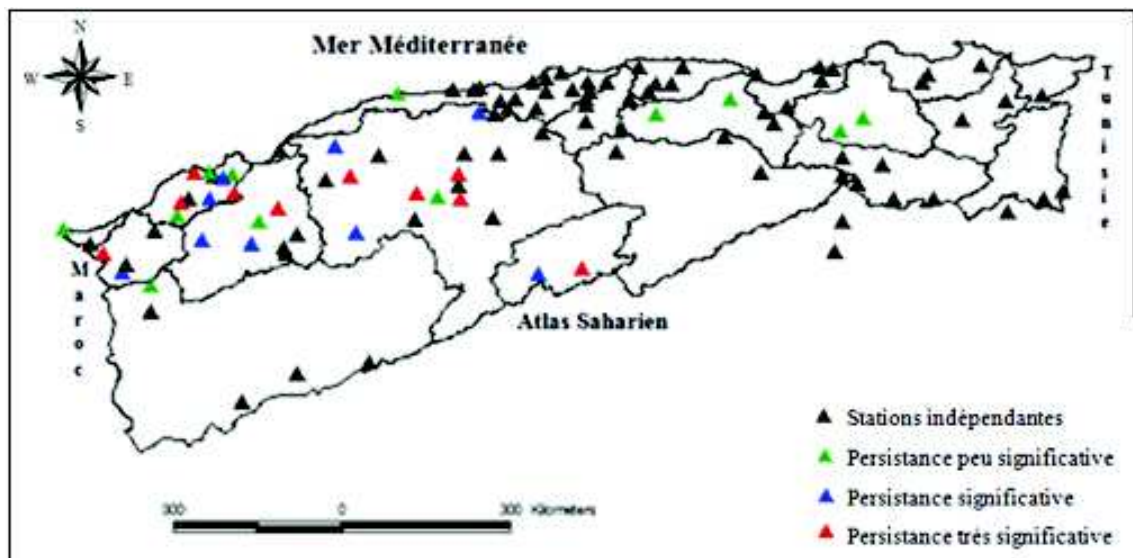


Figure 23 : Répartition des coefficients d'auto-corrélation dans la zone d'étude.

D'après la carte (figure 23), nous pouvons dire qu'on ne peut parler de persistance interannuelle des précipitations que dans la zone Ouest de la région d'étude où 19 stations ont enregistré des coefficients d'auto-corrélation d'ordre 1 significatifs (au seuil de 5%).

5-2-2-2- Analyse de la persistance des années sèches par quartile

En général, une période sèche est caractérisée par la succession de plusieurs années sèches. Pour mettre en évidence la persistance de la sécheresse, nous avons recensé deux anomalies annuelles successives inférieures au premier quartile (25%). Une analyse statistique est établie dans ce sens, pour déterminer la probabilité de succession de deux années sèches (**SDAS**) dans une série de données pluviométriques.

Nous avons représenté sous forme d'histogramme la fréquence relative en fonction de la probabilité de succession de deux années sèches pour chaque région. Dans notre cas, la fréquence relative correspond au pourcentage de stations présentant un pourcentage de probabilité donné.

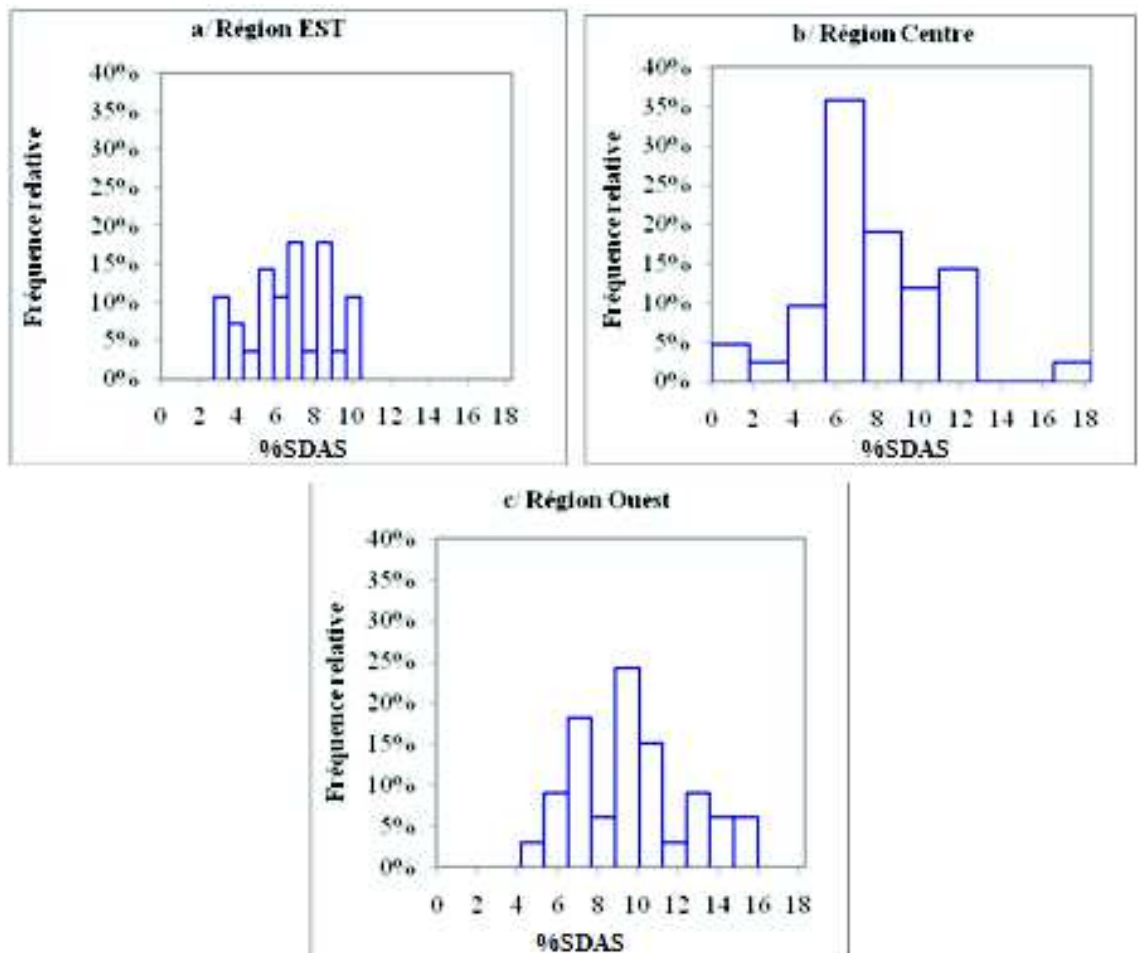


Figure 24 : Histogrammes des fréquences relatives des stations en fonction des probabilités de succession de deux années sèches pour chaque région.

En moyenne, nous constatons que le pourcentage de SDAS est plus important à l'Ouest (%SDAS=9,67%), il varie entre 4,17% à la station de Boufatis (040518) et 15,94% à la station de Tielat (040418). Au centre, le pourcentage de SDAS est de 7,44%. Ce pourcentage ne dépasse pas 11,27% (à Khemisti (011004)), à l'exception des stations du Zahrez (17) qui indiquent un pourcentage de 12,5% à Djelfa (170208) et 18,31% à Charef (170102). La station de Bouassem (021801) ne connaît pas de succession d'années sèches (%SDAS=0%). Les stations de l'Est de la zone d'étude ne sont pas aussi touchées par

la sécheresse. Le pourcentage de SDAS est de 6,56%, il varie entre 2,82% à Ain Yagout (070306) et 10,45% à Bouhadjer (031503) (Annexes 02).

Selon l'histogramme de la région Est, 22% des stations présentent une probabilité de SDAS en dessous de 5%, et 78% ont une probabilité en dessus de 5%. Cette probabilité ne dépasse pas 11%.

Au centre, le pourcentage de probabilité ne dépasse pas 13%. 17% des stations indiquent une probabilité de SDAS inférieure à 5,5%. 36% des stations présentent une probabilité de SDAS entre 5,5% et 7% et 31% des stations ont une probabilité de SDAS entre 7% et 11%.

16% des stations montrent une probabilité de SDAS supérieure à 11%.

À l'ouest, le pourcentage de probabilité est plus important il atteint un maximum d'environ 16%. 12,5% des stations présentent une probabilité de SDAS entre 4% et 6,5%. 63,5 % des stations présentent une probabilité comprise entre 6,5% et 11% et 24% des stations présentent une probabilité au dessus de 11%.

Une comparaison de la fréquence relative pour une probabilité au dessus de 11%, met en évidence qu'à l'Est cette fréquence est nulle, elle est de 16% au centre et 24% à l'Ouest. Ce ci reflète plus au moins, le degré de persistance de la sécheresse d'une région à l'autre de la zone d'étude.

L'analyse des probabilités de succession de deux années sèches fait apparaitre, pour l'ensemble des stations, que cette anomalie devient importante (fréquente) à partir de la moitié des années 70 surtout pendant les années 80 et 90 et peut être continue sur toute une décennie. Comme, la station de Charef (sur le Zahrez) qui indique une moyenne pluviométrique annuelle inférieure au premier quartile de 1980 à 1990.

En générale, cette succession prend fin en 2001, mais peut atteindre 2007 pour quelques stations de l'ouest. Comme, la station de Bouhadjer (040415) qui indique une succession d'années sèches de 2001 à 2007.

5-2-3- Instabilité des régimes

L'étude de la variabilité du régime pluviométrique permet de mettre en évidence l'instabilité des précipitations d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre, même si le total annuel ne varie pas. Ainsi, pour un même total pluviométrique annuel, la distribution temporelle des précipitations varie d'une année à l'autre. Généralement les activités agricoles, l'écoulement des cours d'eau ainsi que l'alimentation des nappes dépendent du régime pluviométrique de la saison pluvieuse, dont l'instabilité les affecterait négativement en générant de graves problèmes.

Pour caractériser cette structuration, nous étudierons l'instabilité du régime, par l'analyse des poids des variations mensuelles sur le total annuel, la position du maximum ainsi que par un indice de variabilité du régime calculé sur toute la zone d'étude.

5-2-3-1- Poids des variations mensuelles sur le total annuel

Nous étudierons la part de chaque mois dans la variance de la pluviométrie annuelle, en analysant la corrélation entre les précipitations de chaque mois sur le total annuel. Théoriquement, les mois les plus arrosés devraient être les mieux corrélés.

Pour déterminer les mois qui influent le plus sur le régime annuel des précipitations, nous avons choisi quelques stations (les plus complètes) réparties sur la zone d'étude d'est

en ouest et en fonction du type de relief (littoral, zone montagneuse, hauts plateaux) (tableau 07). Une corrélation a été effectuée par la suite entre la pluie de chaque mois et la pluie annuelle

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annual
Ouest													
Marsa Ben M'hidi	16,62	28,43	38,65	44,12	41,5	48,68	40,02	37,99	26,66	7,74	0,93	1,96	333,31
	0,45	0,29	0,29	0,60	0,21	0,42	0,45	0,33	0,23	0,28	0,26	0,26	
Khemis Ould Moussa	17,49	34,41	44,58	72,28	73,15	63,18	68,5	56,04	41,65	11,84	3,19	4,24	490,53
	0,30	0,28	0,24	0,52	0,47	0,38	0,37	0,50	0,23	0,24	0,22	0,20	
El Aoudj	17,25	21,63	21,03	18,8	21,01	19,36	23,17	26,4	22,39	11,52	5,23	6,89	214,68
	0,35	0,38	0,13	0,37	0,29	0,33	0,44	0,48	0,31	0,28	0,29	0,18	
Centre													
Cherchell	24,59	66,12	81,46	96,46	84,19	64,66	51,83	47,4	30,9	10,29	1,92	4,3	564,11
	0,29	0,45	0,44	0,32	0,19	0,49	0,47	0,31	0,10	0,24	0,08	0,14	
Larba Nath Irathen	42,99	84,91	122,69	150,6	136	105,86	106,47	110,9	64,38	20,24	4,50	8,18	957,70
	0,27	0,21	0,39	0,38	0,47	0,49	0,29	0,42	0,40	0,25	0,08	0,19	
Colonel Bougara	26,37	35,91	30,37	38,59	41,13	34,41	33,09	34,98	27,24	16,17	4,16	7,74	330,18
	0,27	0,35	0,23	0,20	0,25	0,32	0,29	0,39	0,36	0,22	0,34	0,17	
Est													
Berrahal	28,07	64,85	84,29	122,47	105,24	76,33	60,56	53,44	35,18	11,43	1,74	7,9	651,49
	0,20	0,26	0,26	0,42	0,41	0,38	0,34	0,42	0,17	-0,02	-0,07	-0,08	
Foum Toub	44,23	38,61	37,08	52,33	43,86	32,75	47,11	49,52	48,5	27,31	13,62	21,35	456,26
	0,29	0,39	0,22	0,32	0,47	0,14	0,29	0,41	0,48	0,27	0,13	0,28	
Ain Djasser	28,68	21,64	20,66	34,25	27,23	21,07	28,41	35,59	30,2	14,34	6,66	14	282,75
	0,36	0,29	0,22	0,44	0,37	0,29	0,52	0,38	0,25	0,29	0,01	0,29	

Tableau 07 : pluies mensuelles interannuelles de quelques stations de la zone d'étude en fonction du relief et leur coefficient de corrélation.

Une comparaison entre la moyenne des précipitations de chaque mois et le coefficient de corrélation par rapport au total annuel met en évidence que le mois le plus pluvieux n'est pas toujours le plus corrélé. C'est le cas, par exemple, du mois de février qui est le plus pluvieux à la station de Marsa Ben M'hidi (figure 25), tandis que c'est le mois de décembre qui présente une forte corrélation (60%). Aussi à Cherchell (figure 26) et Larbaa Nath Yrathen, nous relevons une forte corrélation au mois de février alors que le mois de décembre se trouve le plus pluvieux. À la station de Berrahal, les mois de décembre et avril présentent la même corrélation avec la pluie annuelle (42%) (figure 27), alors que les pluies de décembre sont très importantes.

Les saisons qui sont déterminantes sur le régime pluviométrique annuel sont l'hiver et le printemps.

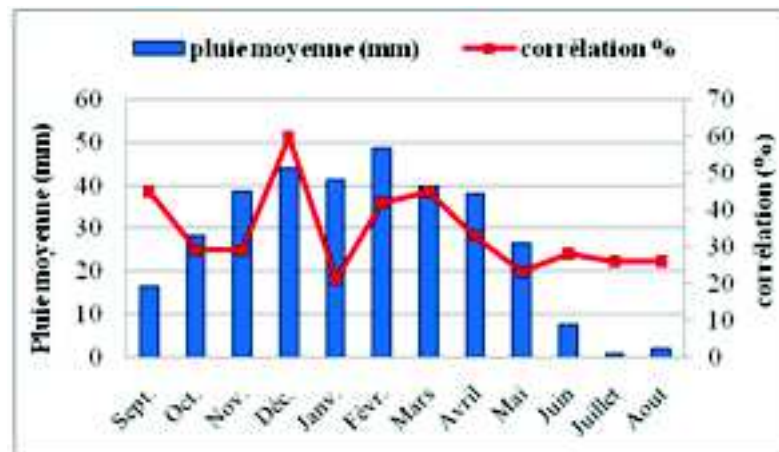


Figure 25 : Précipitations mensuelles interannuelles et coefficient de corrélation à Marsa Ben M'hidi.



Figure 26 : Précipitations mensuelles interannuelles et coefficient de corrélation à Cherchell.

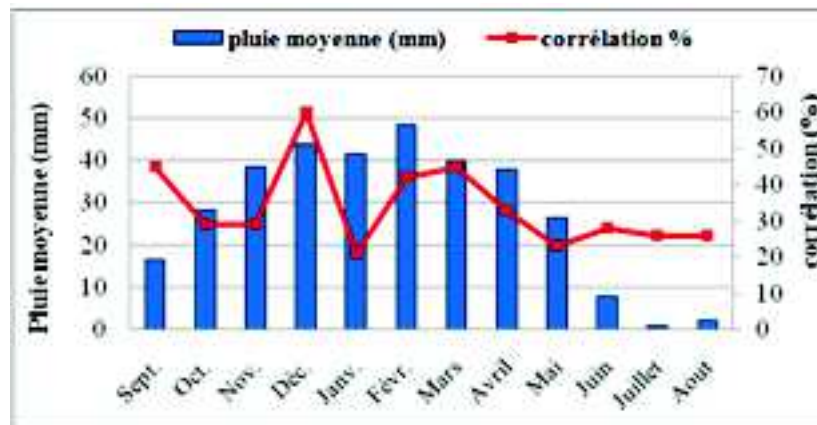


Figure 27 : Précipitations mensuelles interannuelles et coefficient de corrélation à Berrahal.

5-2-3-2- La position du maximum

Les précipitations sont généralement concentrées chaque année entre Octobre et Mai, la distribution varie cependant, d'une année à une autre (figure 28). En effet, l'instabilité du régime pluviométrique peut aussi être mise en évidence par le changement de la position du maximum mensuel.

Nous avons recensé pour chaque mois le nombre de fois où ce mois a enregistré le maximum pluviométrique pendant la période d'étude 1936/1937-2008/2009. Pour cela une probabilité est calculée pour tous les mois de l'année et pour toutes les stations et est donnée en pourcentage.

D'après les résultats (annexes 03), nous constatons que ce sont **les mois d'hiver** qui enregistrent un maximum sur les bassins côtiers, l'Isser, et la Soummam (02, 03, 04, 09, 15). Ce maximum est important au mois de décembre surtout sur le côtier Constantinois (03) à l'Est, puisque le pourcentage de probabilité dépasse pratiquement 30%. Toujours à l'Est, les stations qui se trouvent sur le Kebir Rhemal (10) et la Seybouse (14) enregistrent, elles aussi, un maximum en hiver. Tandis que, La position du maximum sur Chott EL Hodna (05) et les hauts plateaux constantinois (07) se trouve au **printemps** pendant les mois d'avril et de mai.

Sur le Zahrez (17), le maximum semble être enregistré en automne, car dans cette région le maximum pluviométrique peut se produire durant n'importe quel mois entre octobre et mai.

Sur le Cheliff, le maximum est important au mois de Janvier. Par contre, les stations de Rechaiga (010703) et Ksar Chellala enregistrent un maximum au printemps (avril, mai).

À l'Ouest, sur la Macta et la Tafna, la position du maximum est importante en hiver, les stations de Keroua (111113) et Bouchikhi (111219) font exception et indiquent un maximum au mois de mars. Sur les hauts plateaux Oranais (08), la position du maximum apparait au printemps (mars, avril) à l'exception de Naama qui enregistre son maximum au mois de janvier.

Nous pouvons conclure que le maximum pluviométrique est enregistré le plus souvent en hiver pendant les mois de décembre et janvier au littoral, et au printemps pendant les mois d'avril et de mai à l'extrémité sud de la zone d'étude.

5-2-3-3- Indice de variabilité pluviométrique

Utilisé par Camberlin P. (1994) et Tchiadeu G. (2000), cet indice a donné des résultats satisfaisants sur la caractérisation de la variabilité à l'intérieur des saisons.

L'indice de variabilité pluviométrique s'écrit sous la forme suivante :

$$IVR = \frac{1}{na} \sum_{a=1}^{na} \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{|RR(j, a) - RM(j)|}{RM(j)} \right)$$

na représentant le nombre d'années, $RR(j, a)$ le rang du mois j pour l'année a et $RM(j)$, le rang du mois j en année moyenne.

La carte suivante (figure 29) synthétise la variabilité du régime pluviométrique de chaque station exprimée par l'indice de variabilité.

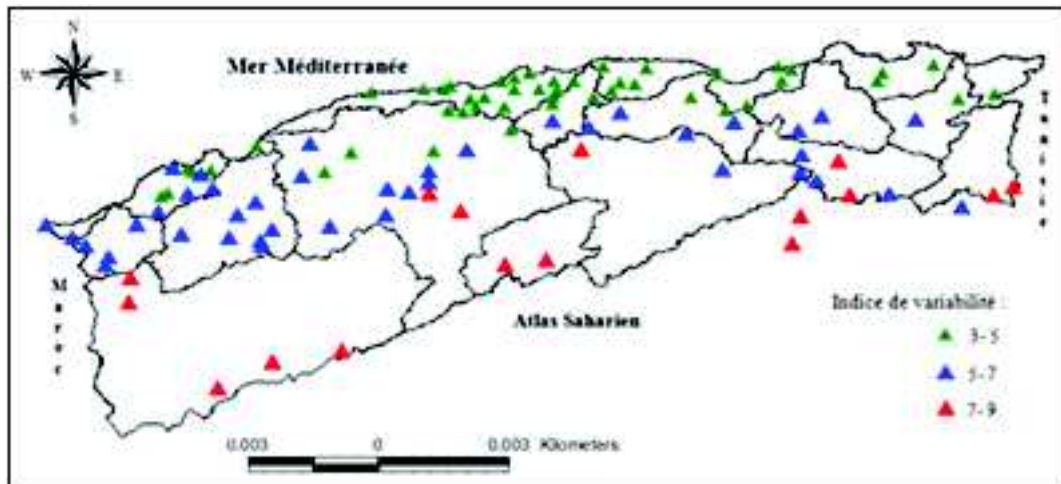


Figure 29 : Indice de variabilité du régime pluviométrique.

D'après la figure, nous constatons que l'indice de variabilité varie significativement du Nord au Sud et d'Est en Ouest. Sur le littoral Est et Centre, la valeur de l'indice de variabilité est moins importante, elle varie entre 3 et 5. À l'Ouest cet indice dépasse 5 dans certaines régions.

Sur les hauts plateaux, la variabilité augmente, elle varie entre 5 et 7, et devient plus importante sur l'extrémité sud de la zone d'étude (surtout sur les hauts plateaux Oranais et le Zahrez), elle atteint 9 à Foum El Ghorza (extrémité Sud-est Chott Melrhir).

Conclusion

L'analyse de la variabilité du régime pluviométrique repose d'abord sur une bonne homogénéisation des données qui est une étape prépondérante pour l'exploitation de ces données. Après homogénéisation plusieurs stations sont restées hétérogènes surtout celles de l'Ouest.

L'analyse du régime pluviométrique à l'échelle spatiale par le coefficient de variation n'a fait que confirmer la forte variabilité des précipitations d'Est en Ouest et du Nord au sud, qui est principalement liée aux grands ensembles géographiques du pays. Effectivement, la chaîne de l'atlas tellien surplombe le littoral et reçoit, de plein fouet, les flux humides du Nord ouest et du Nord beaucoup plus que l'Ouest. Le Tell-Est est plus exposé à ce flux que le tell-Ouest, car ce dernier se trouve en position d'abri par rapport aux chaînes montagneuses du Rif Marocain. À latitude égale, il pleut plus à l'est qu'à l'ouest.

Le contraste pluviométrique apparaît plus important en allant du Nord au Sud. L'atlas tellien fait écran aux plaines et bassins de l'intérieur en empêchant les vents humides d'y parvenir. Ces pluies sont irrégulières et souvent brutales avec de fortes intensités. Les hautes plaines reçoivent l'humidité des vents qui arrivent à franchir les montagnes de l'atlas Tellien. Ces vents sont beaucoup plus secs et ce d'autant plus que l'on s'éloigne en direction sud. Ce qui fait que la pluviométrie diminue du Nord au Sud de cette zone.

Pendant l'année les précipitations enregistrent leur maximum durant l'hiver et le printemps. Ces deux saisons influencent beaucoup la variabilité annuelle des précipitations.

L'analyse de la persistance des années sèches par quartile a mis en évidence à l'échelle spatiale la variation du degré de sévérité de la sécheresse d'Est en Ouest. À l'échelle du

temps, cette persistance apparaît plus importante pendant les années 80 et 90 et commence à prendre fin à partir de 2001.

chapitre 6 : Analyse du régime pluviométrique par les tests de rupture

Introduction

Le test d'homogénéité de Wilcoxon appliqué aux séries pluviométriques a révélé l'existence de plusieurs séries hétérogènes. Afin d'explorer cette hétérogénéité nous avons utilisé un ensemble de tests statistiques, à savoir ; le test de Pettitt, le test de Kendall, le test de Buishand, la statistique de Lee et Héghinian et la procédure de segmentation de Hubert. Ces tests ont pour objectif de déceler les ruptures ou tendances au sein d'une série chronologique de données.

Ces tests sont regroupés dans le logiciel Khronostat réalisé par l'IRD, l'Université de Montpellier et l'École des Mines.

Les conditions d'application de ces tests sont intéressantes à connaître, pour une bonne interprétation des résultats.

Le test de corrélation sur le rang « Kendall » est un test non paramétrique, il ne suppose aucune propriété particulière de la série chronologique étudiée.

Le test de Pettitt s'applique à des séries non auto-corrélées et requiert implicitement que la variance de la série ne soit pas affectée par la rupture si une rupture en moyenne est prioritairement recherchée.

La statistique de Buishand repose sur l'ensemble des hypothèses suivantes ; normalité de la série, égalité des variances des distributions de part et d'autre du point de rupture, et absence d'auto-corrélation.

La procédure bayésienne de Lee et Héghinian impose normalité, non auto-corrélation et constance de la variance.

La segmentation d'Hubert qui fait intervenir le test de Scheffé sous-entend implicitement la normalité de la série chronologique.

Une étude sur la puissance et la robustesse des tests de rupture a été réalisée par Lubès Niel H. et al (1998). Pour les tests classiques, il en résulte que le test de Kendall apparaît puissant lorsque la non-stationnarité relève d'une tendance ou d'une rupture significative sur la moyenne. Par contre il n'est pas sensible à un changement brutal de l'écart type.

Il semble par conséquent que le test de Pettitt n'ait pas la même puissance selon la caractéristique statistique affectée par une rupture, seule une rupture sur la moyenne peut être raisonnablement estimée.

Le test de Buishand apparaît relativement puissant pour des ruptures sur la moyenne d'amplitude même modérée.

La procédure bayésienne de Lee et Héghinian n'est pas mise en œuvre comme un test classique visant à confirmer ou à infirmer une hypothèse nulle. Toutefois elle est assimilée

à une démarche de prise de décision qui en l'occurrence consiste à déclarer la série stationnaire ou non par analyse de la densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture.

Nous avons utilisé ces cinq tests de rupture à l'échelle annuelle ainsi qu'à l'échelle saisonnière pour chaque série pluviométrique de la zone d'étude sur la période 1936/1937-2008/2009.

6-1- Résultats des tests de rupture à l'échelle annuelle

Appliqués à chaque série pluviométrique, ces tests ont donné des résultats généralement concordants du moins au niveau de la reconnaissance d'une hétérogénéité dans la série, même si les estimations des ruptures sur la moyenne des séries données par les différentes procédures ont différé parfois de quelques années. Toutefois les différentes méthodes ont quelquefois débouché sur des conclusions différentes sur une même série de données (annexes 04).

La stationnarité des séries pluviométriques est déterminée à un niveau de confiance de 95%.

D'après les résultats obtenus (annexes 04) nous constatons, dans l'ensemble, que les différents tests présentent pratiquement les mêmes résultats pour chaque station. Le point de rupture décelé au niveau des séries pluviométriques apparaît en moyenne entre 1970 et 1986 avec un changement de moyenne variable d'une station à une autre. Seules 9 stations enregistrent une rupture située en dehors de ces dates (Sougueur en 1943, Marsa Ben M'hidi en 1950, Bejaia et El Aouinet 1959, Texenna en 1961, Bou Hnaifia en 1964, Oued El Ma, Fom El Ghorza, et Tadjanet en 1969).

La carte suivante (figure 30) indique la répartition des stations avec et sans rupture sur tout le Nord Algérien.

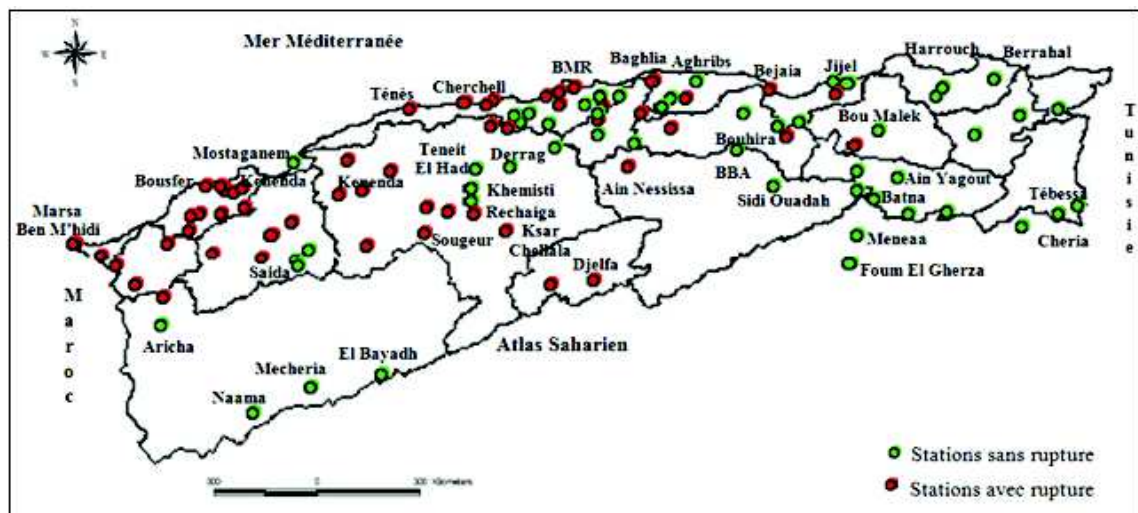


Figure 30 : Localisation des stations avec et sans rupture à l'échelle annuelle.

Selon la carte, nous constatons qu'à l'Ouest de la zone d'étude, les tests statistiques semblent indiquer une rupture généralisée pour toutes les séries pluviométriques annuelles.

Sur le côtier Oranais (04) : sur 13 stations, seule la station de Mostaganem, ne présente pas de variation pluviométrique. Les deux stations de Sidi Bou Djnane et

Ain El Arba indiquent un changement de moyenne inférieur à 20% les autres stations du côtier Oranais enregistrent des variations importantes de la pluviométrie allant de 21% à la station d'Oran jusqu'à 42% à la station de Bousfer.

- **sur la Macta (16) et le Tafna (11) :** 9 stations indiquent une rupture très significative avec une variation pluviométrique dépassant les 30% pour certaines stations (Daoud Youb, Beni Ouassine, Bou Hnifia, Khemis Ould Moussa). Seules, les trois stations de Saïda, Keroua et Bouchikhi ne présentent pas de rupture, elles sont stationnaires.
- **sur les hauts plateaux Oranais (08) :** les trois stations de Naama, Mecheria, et El Bayadh situées tout à fait au sud du bassin versant, n'indiquent aucune sensibilité vis-à-vis d'un changement de moyenne. Les stations d'El Aoudj et El Aricha situées tout à fait à l'ouest du bassin indiquent, quant à elles, un changement de moyenne qui ne dépasse pas les 22%.
- **sur le Cheliff (01) :** 5 stations sur 16 présentent une régularité du régime pluviométrique. Les autres stations enregistrent une baisse très significative des précipitations qui dépasse les 25%. Cette baisse atteint 43% à la station de Kenenda.

Dans la région centre du Nord Algérien nous constatons que :

- **sur le côtier Algérois (02) :** les stations ne répondent pas toutes de la même manière aux différents tests. De ce fait, les cinq tests confirment que 8 stations sur 23 ne présentent aucune rupture du régime pluviométrique (deux bassins, Pépinière d'Alger, Bou Medfaa, Ahmer El Ain, El Hamdania, Larbaa, Aghribs, Bouassem). Seule la méthode de segmentation d'Hubert a détecté une variation pluviométrique de 15,83% à la station de Boghni, à partir de 1975.
- Les 6 stations de Meurad, Cherchell, Bir Mourad Rais, Hamiz, Larebaa Nath Irethen, et Baghliia enregistrent une baisse de la moyenne pluviométrique avec un taux de variation inférieur à 20%. Alors que, ces stations confirment l'hypothèse nulle de « stationnarité » par un des trois tests classiques (Pettitt, Kendall, Buishand). Les 9 stations restantes indiquent une rupture significative, mais qui ne dépasse pas les 25% (entre 18% et 25%) sauf pour la station de Fouka qui enregistre un déficit de 32,32%. La station de Gouraya enregistre une augmentation de 16% des précipitations à partir de 2005.
- **sur l'Isser (09), la Soummam(15) et Chott El Hodna (05) :** 5 stations sur 12 indiquent une baisse de la pluviométrie, cette baisse ne dépasse pas 20% à Tablat (09), Djebahia (09) et Bouhira (15), tandis qu'elle dépasse légèrement 20% à Ain Nessissa (05) et El Asnam (15). Les autres stations indiquent une stabilité du régime pluviométrique. Les stations de Sour El Ghozlane (SEG), Bordj Bou Arridj (BBA) et Oued El Ma (OEM) enregistrent respectivement une augmentation d'environ 29,5%, 26% et 49% à partir de 2002.
- **sur le Zahrez(07) :** les deux stations de Djelfa et Charef indiquent une rupture très significative d'environ 50%. La station de Djelfa connaît une augmentation des précipitations de 10,5% à partir de 2005.

A l'Est de la zone d'étude les tests montrent qu'il n'y a pas eu de rupture pour la plupart des stations.

- **sur le côtier Constantinois(03) :** à l'exception de Texenna qui enregistre une baisse de la pluviométrie d'environ 16%, toutes les autres stations sont stationnaires. La procédure de segmentation ainsi que la méthode bayésienne de Lee et Héghinian indiquent, pour la plupart des stations, une augmentation de la pluviométrie à partir de 2002. Cette augmentation atteint 24% à Berrahal et 29% à Amoucha.

- **Sur le bassin du kebir Rhumel (10), le Seybouse (14), les hauts plateaux constantinois (07) et la Medjerda (12) :** toutes les stations sont stationnaires, mises à part, la station de Tadjanet (10) qui enregistre une baisse de 15,5%. Les stations de Boumalek, Ain mimoun, Tebessa, et El Kouif enregistrent une augmentation considérée de la pluviométrie à partir de 2002. cette augmentation dépasse 25% et atteint 47% à Boumalek.
- **Le bassin versant de Chott Melrhir (06)** ne fait pas partie du Nord Algérien, néanmoins 3 stations ont été choisies. la station de Foum El Gherza indique une rupture significative dépassant 30% à partir de 1969. les stations de Meneaa et Cheria sont stationnaires et sont marquées par les fortes précipitations de 2008 (selon la méthode de Lee et Heghignian).

Nous avons mentionné dans le premier chapitre qu'une rupture dans une série de données peut se traduire soit par un changement brutal de la moyenne, soit par une tendance à la baisse (diminution progressive). Le test de Pettitt est utilisé pour la détection de changement brutal de la moyenne pluviométrique, et le test de Kendall pour la détection d'une tendance.

Dans notre travail, nous avons rencontré trois catégories de rupture :

- Catégorie 1 : stations homogènes, qui ne présentent pas de rupture (ni changement brutal, ni tendance), comme exemple, la station de Batna qui indique une régularité du régime pluviométrique (figure 31)
- Catégorie 2 : stations qui présentent une rupture due à un changement brutal de la moyenne, c'est le cas de la station de Texenna qui indique un changement de la moyenne pluviométrique à partir de 1961 (figure32).
- Catégorie 3 : stations qui présentent une rupture due à la fois à un changement brutal et une tendance à la baisse de la moyenne, telle est la station de Djelfa (figure 33) qui enregistre des précipitations en dessous de la moyenne tout au long de la période 1975-2004.

Dans l'ensemble, les stations de la région Est appartiennent à la première catégorie, et les stations de la région Ouest appartiennent à la troisième catégorie. Au centre, le type de rupture diffère d'une station à l'autre (en fonction de son emplacement), seules, 5 stations font partie de la deuxième catégorie.

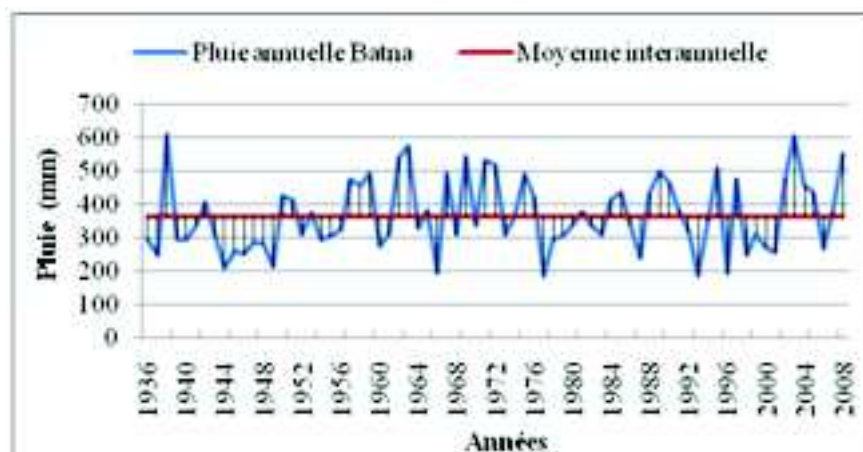


Figure 31 : Cas d'une station où le régime stable (Batna).

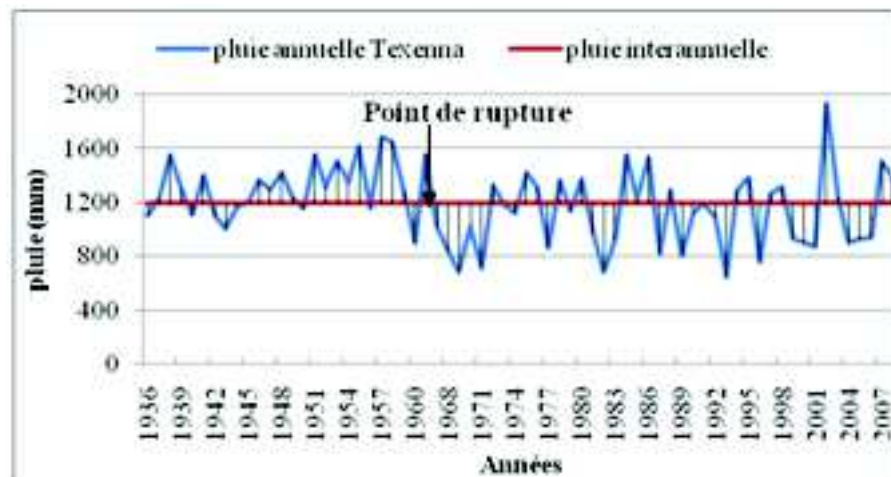


Figure 32 : Cas d'un changement brutal de la moyenne pluviométrique (station de Texenna).

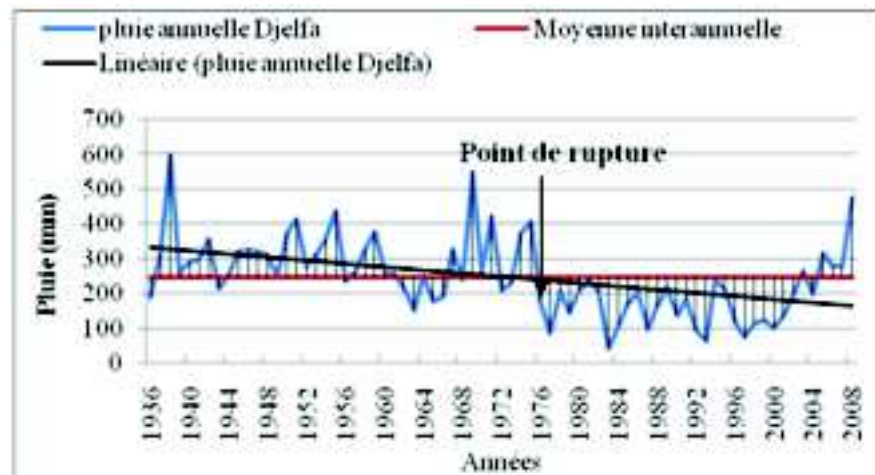


Figure 33 : Cas d'un changement brutal et tendance à la baisse de la moyenne pluviométrique (station de Djelfa).

Le seuil de signification des différentes ruptures, a été déterminé en fonction de la probabilité du test de Pettitt, la carte suivante (figure 34) présente la répartition des différents seuils.

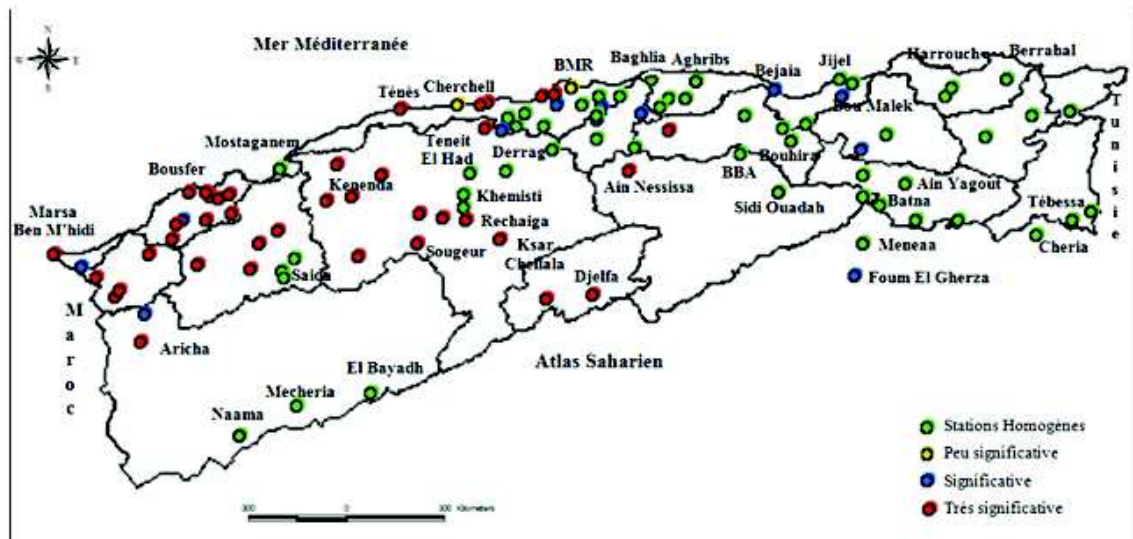


Figure 34 : Seuil de rupture selon le test de Pettitt.

Nous constatons que les stations indiquant une rupture (diminution de la pluviométrie annuelle) ne sont pas réparties d'une façon homogène d'Est en Ouest de la zone d'étude (figure 34). Le caractère semi-aride du Nord de l'Algérie, surtout la partie Ouest, s'explique en grande partie par le climat à travers la circulation générale atmosphérique, les grands ensembles géographiques et la latitude.

Afin d'expliquer cette baisse pluviométrique survenue à la moitié des années 70. Un intérêt est accordé à l'évolution de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). Comme il a été dit précédemment (chapitre 01), plusieurs études ont liés la diminution des précipitations à l'oscillation nord atlantique (NAO) qui influe sur le climat méditerranéen (Xoplaki et al, 2000 ; Riccard J.L., 2000, Combourieu Nebout N. et al, 2009 ; Cassou C., 2004).

L'oscillation nord-atlantique qui désigne la différence entre les anticyclones des Açores et les dépressions d'Islandes, se caractérise par un indice. L'indice se calcul pour chaque hiver et il est compris entre -5 et +5. Un indice NAO positif se manifeste par des vents forts et rapides d'ouest-sud-ouest balayant l'océan Atlantique, il engendre des tempêtes et des précipitations fréquentes sur le nord de l'Europe et des sécheresses sur l'Afrique du Nord. Moins la différence des anomalies de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande est importante plus l'indice NAO est négatif. Comme le vent d'ouest est calme l'anticyclone de la Sibérie amène de l'air froid et sec sur l'Europe. Les perturbations s'engouffrent plus au sud, apportant des pluies sur les régions méditerranéennes.

La NAO est considérée comme un facteur explicatif du climat des régions méditerranéennes et de l'Europe. Du début des années 40 jusqu'au début des années 70, l'indice NAO a eu tendance à diminuer, ce qui correspondit à une période où les précipitations hivernales étaient fréquemment supérieures à la normale. Une forte hausse de l'indice NAO s'est produite au cours des 25 dernières années provoquant une diminution des précipitations sur toute la région méditerranéenne et l'Afrique du Nord.

Ces observations semblent concorder avec les résultats obtenus par les tests de rupture pour le Nord Algérien surtout la région ouest caractérisée par une baisse importante et générale des précipitations à partir des années 70. Les études menées, sur la relation entre l'indice NAO et la pluviométrie de l'ouest Algérien, ont montré l'existence d'une corrélation significative entre la NAO et la pluviométrie annuelle (Ketrouti et al., 2003 : in

Meddi H., 2009 ; Meddi M., 2010 ; Khaldi A., 2005). Cette relation significative peut expliquer en partie l'évolution du régime pluviométrique.

En 2008 le cycle NAO est entré en transition de la phase positive à la phase négative. Selon le professeur Latif M. (2009), nous assisterons à un refroidissement naturel des 10 à 20 années à venir. (www.laterredufutur.com).

Cependant la variabilité de la pluviométrie n'est pas expliquée uniquement par l'oscillation nord atlantique. En Algérie, les facteurs géographiques jouent aussi un grand rôle dans la répartition des précipitations d'ouest en est et du nord au sud.

- Quelles sont alors les caractéristiques géographiques qui influencent la variabilité des précipitations au Nord de l'Algérie ?

- Influence du relief

Les chaînes de montagnes agissent comme des barrières pour les nuages. Elles obligent la masse d'air à s'élever ce qui engendre les pluies. C'est le relief qui provoque des déformations dans la dynamique des masses d'air qui se traduit par les variations spatiales des précipitations.

- L'orientation des versants montagneux

Les versants exposés aux vents pluvieux reçoivent toujours plus de pluie que les versants sous le vent.

- L'altitude

Plusieurs études ont montré l'existence d'une relation directe entre la quantité de pluie tombée dans un endroit donné et l'altitude de ce point, l'augmentation des pluies avec l'altitude dépend également de l'orientation du relief par rapport aux flux pluvieux (Medjerab A., 2005).

Sur toute la terre, les nuages qui précipitent ont une base située au dessus d'une couche spéciale de la stratosphère, une couche que les météorologistes appellent **l' « inversion thermique »**.

Située généralement à une altitude comprise entre 900 et 1800 m, il fait, à l'intérieur de celle-ci, plus chaud qu'au-dessous et qu'au-dessus. À l'intérieur de cette couche d'inversion thermique (sur des terrains en pente, de moyenne montagne, par exemple) on peut assister aux plus fortes pluies (les plus grosses qui puissent exister).

- La latitude

La diminution importante des précipitations du nord au sud dans la zone d'étude est à l'origine de l'importance de l'effet de la latitude.

- La distance à la mer

Il existe une relation entre les précipitations et la distance à la mer. Généralement plus on se rapproche de la mer plus les précipitations sont importantes.

Les facteurs géographiques cités précédemment, sont très intéressants pour expliquer la répartition géographique des différentes classes de rupture, sur le Nord Algérien.

À l'Est toutes les stations présentent une stationnarité du régime pluviométrique. Les stations côtières sont pratiquement exposées à la mer, et en absence de barrière orographique elles reçoivent directement les précipitations du Nord. Excepté, les stations de Bejaia et Texenna qui présentent une légère rupture, ceci peut être lié au relief qui les

entoures ; la station de Texenna se trouve incrustée dans le massif de Djebel Tamesguida qui culmine à plus de 1000m d'altitude, tandis que la station de Bejaia se trouve plus influencée par la direction des précipitations, surtout celles provenant du Nord-Ouest qui vont rencontrer le Massif du Djurdjura.

Les stations des hauts plateaux sont, elles aussi, bien situées par rapport à la barrière orographique et se trouvent à des altitudes supérieures à 800m, de ce fait elles ne présentent pas de tendance à la baisse des précipitations (d'Ain Djasser, Ain Yagout, Bouchegouf et Ain Makhoulf...etc.).

Plus au sud sur le bassin de Chott Melrhir, les stations de Meneaa et Fom El Gherza sont stationnaires. La station de Meneaa se trouve sur le versant nord de Djebel Aurès à une altitude de 1005m et la station de Cheria à une altitude de 1080m. Tandis que la station de Fom El Ghorza, indique une rupture significative du régime pluviométrique. Les pluies n'atteignent pas cette station, située au versant sud de Djebel Aurès, à une altitude de 200 m. nous pouvons constater l'effet direct de l'orientation des versants et l'altitude sur le régime des précipitations.

Au centre de la zone d'étude, on assiste à différents types de rupture. Les stations côtières (Cherchell, Sidi Ghiles, Gouraya, Fouka, Bir Mourad rais, et Mahalma) se trouvent face à la Mer sur la bande du sahel, mais leur régime pluviométrique est influencé par la direction des pluies et la barrière orographique située à l'arrière de ces stations. La quantité de pluie varie en fonction de l'altitude, elle atteint 530 mm à Ténès (5m d'altitude) et 750 mm à Bir Mourad Rais (140m d'altitude).

Les stations situées sur la partie Est de l'Algérois (Aghribs, Larbaa Nath Yrathen, Bouassem et Boghni) ne présentent pas de rupture, elles se trouvent à des altitudes importantes et le relief est accentué. Cette région est la plus arrosée de la zone d'étude, les quantités de précipitations peuvent dépasser 1000 mm.

L'effet de l'orientation des versants apparait bien pour les stations situées sur le versant Nord de l'Atlas Blidéen qui n'indiquent aucune tendance à la baisse (Meurad, Bou Medfaa, Ahmer El Ain, El Hamdania, et Larbaa). Alors que pour la station d'El Asnam située sur le bassin de la Soummam, la rupture est très significative, du fait qu'elle se trouve sur le versant sud de Djurdjura à 435m d'altitude, elle est donc influencée par le relief et les hautes altitudes qui les entourent. La station d'Ain Nessissa (à l'Ouest du dahra (05)), indique elle aussi une rupture très significative, du fait qu'elle soit située sur le versant sud de djebel Dira.

L'influence de la barrière orographique différencie certaines stations du haut Cheliff (Colonel Bougara, Khemisti, Derrag, Zoubiria et Teneit El Had) qui ne présentent pas de rupture du fait qu'elles soient bien exposées aux précipitations (pas d'obstacle orographique), et d'autres stations du bas Cheliff (hauts plateaux) (de Rechaiga, Ksar Chellala, Mehdi, Sougeur, et Sidi Hosni) qui indiquent une rupture très significative à cause du relief qui les entoure ainsi que la direction des précipitations. Ces stations se trouvent dans la même région orographique et reçoivent pratiquement les mêmes quantités de précipitations.

Les stations situées à l'extrémité nord-ouest du Cheliff (Ammi Moussa, Kenenda, Sidi Lakhder et Sidi M'hamed Ben Aouda), indiquent une forte tendance à la baisse. Ces stations sont piégées entre le Dahra et les monts de Beni Chougrane qui font frontière si la direction des nuages provenait de cet endroit.

À l'ouest de la zone d'étude, toute la région semble présenter une rupture très significative du régime pluviométrique. Le relief est beaucoup moins important qu'à l'Est, et l'altitude ne dépasse pas 450m pour la plupart des stations.

Les stations côtières sont plus influencées par la direction des précipitations que par le relief, elles présentent toutes une baisse importante de la pluviométrie excepté celle de Mostaganem.

À l'ouest l'effet de l'orientation des versants apparait uniquement dans la répartition de la quantité des précipitations et non dans la stationnarité du régime pluviométrique, c'est le cas de la station de Tamzourath située au versant nord des Monts du Tessala à 189m d'altitude, qui reçoit une pluie d'environ 390 mm, tandis que la station de Tlelat, située à 280m d'altitude, à l'aval des Monts du Tessala, reçoit une pluie de 340 mm (soit une différence de 50mm de pluie pour une différence de 90m d'altitude environ). Sur la Tafna (16), la station de Beni Ouassine située à 413m d'altitude sur le versant sud des monts de Traras, présente la plus faible pluviométrie du bassin d'environ 310mm. La station de Beni Bahdel est située sur le versant nord des monts de Tlemcen à 666m d'altitude et reçoit une pluie d'environ 480mm. La station de Khemis Ould Moussa est la plus arrosée, elle se trouve sur les sommets des monts de Tlemcen avec une pluie d'environ 490 mm.

Seules les stations de Karoua, Bouchikhi, et Saida (situées sur la Macta (11)) se trouvent à des altitudes très importantes (plus de 900 m), c'est pour cette raison qu'elles ne présentent pas de tendance à la baisse des précipitations.

Les stations situées à l'extrémité Sud Ouest de la zone d'étude sur le bassin de Chott Ech Chergui (08) (Naama, Mechria et El Bayadh) sont stationnaires, elles se trouvent au piedmont de djebel Amour à plus de 1000m d'altitude.

6-2- Résultats des tests de rupture à l'échelle saisonnière

Pour connaître les saisons influençant la variation annuelle du régime pluviométrique sur le Nord Algérien, nous avons appliqué les tests de rupture pour chaque saison de l'année et pour toutes les séries.

Les résultats obtenus montrent que toutes les séries présentant une rupture annuelle (baisse de la moyenne pluviométrique annuelle), indiquent une variation saisonnière (annexe 05.e).

Cette variation saisonnière se manifeste pour la plupart des stations, pendant l'hiver (et l'été pour les stations côtières). Lorsque la variation pluviométrique devient plus importante, les saisons d'automne et de printemps se trouvent touchées aussi par une rupture. L'année de rupture des saisons correspond dans l'ensemble à l'année de rupture annuelle (annexes 05).

Les stations qui ne présentent pas de rupture annuelle, n'indiquent aucune variation pluviométrique pour les différentes saisons (annexes 05.e).

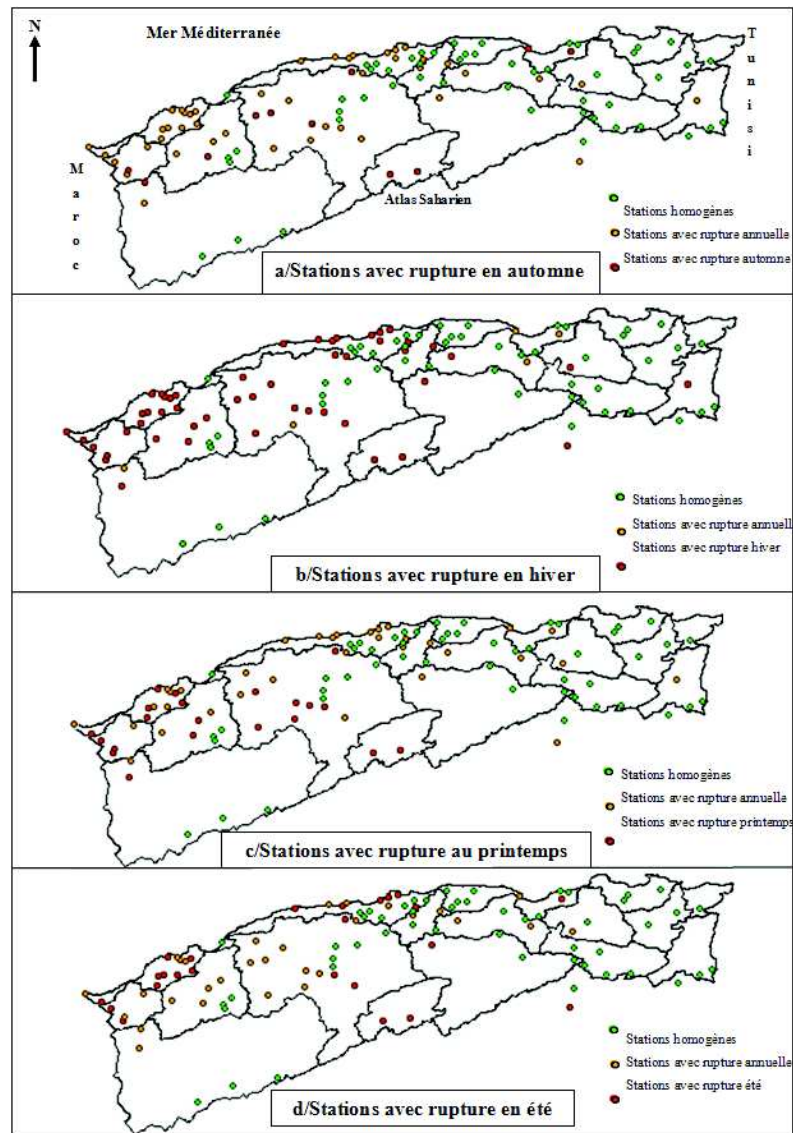


Figure 35 : Rupture pour chaque saison.

En automne, la variation saisonnière n'apparaît que pour certaines stations (annexes 05.a). Sur le Cheliff (01), les stations de Kenenda, Sidi Mdjahed, et Daoud Youb indiquent une baisse d'environ 40% et les stations de Sidi Hosni et Sidi M'hemed Benouda une baisse d'environ 30%. Sur le zahrez, les stations de Djelfa et Charef enregistrent une baisse très importante d'environ 50%. À l'est, la station de Bejaia semble indiquer une variation saisonnière uniquement en automne avec une diminution de 55% et la station de Texenna enregistre une baisse de 25,5%.

Nous relevons que 46% des stations centre et 69% des stations ouest ont été marquées par les fortes pluies d'automne des deux années hydrologiques 2007-2008 et 2008-2009, et enregistrent des augmentations remarquables de précipitations dépassant les 100% à l'ouest.

En hiver toutes les stations semblent indiquer une baisse significative des précipitations. Ceci met en évidence l'influence de **NAO hiver positive** qui a bien marqué la zone d'étude à partir de la moitié des années 1970, surtout la région Ouest. Ce qui explique

autrement la variation interannuelle des précipitations du Nord Algérien. La région Ouest enregistre en moyenne une baisse de 35%, elle varie entre environ 30% à Bensekrane et 52% à Bousfer. Au centre, cette baisse est en moyenne de 30%, elle varie entre 22% à Bir Mourad Rais et atteint 60% à Charef (07). Les stations de l'Est n'ont pas enregistré de tendance décroissante et 50% des stations des hauts plateaux ont été marquées par les fortes pluies de 2007-2008 et 2008-2009 (annexes 05.b).

La variabilité saisonnière des précipitations au printemps n'a touché en général que certaines stations de la partie ouest de la zone d'étude. La plupart de ces stations sont caractérisées par une baisse importante des précipitations annuelles. Une diminution de 40% en moyenne est enregistrée pour cette saison. À l'est 67% des stations enregistrent une augmentation importante des précipitations (entre 37% et 175%) à partir de 2005 (annexes 05.c).

En été, se sont les stations côtières centre et ouest qui sont touchées par une rupture saisonnière. La tendance à la baisse semble très importante, mais dans ce cas elle peut être peu significative, du fait, des faibles précipitations qui caractérisent déjà cette saison (annexes 05.d).

Conclusion

Les tests de rupture ont pu détecter les points ou les années de rupture au sein des séries chronologiques de données pluviométriques. Pour la plupart des stations, ces tests ont permis d'affirmer ou d'infirmer l'hypothèse nulle de stationnarité.

Le point de rupture décelé pour la majorité des séries non stationnaires se situe entre les années 1970 et 1980.

La rupture qui se traduit par une baisse de la pluviométrie se trouve très significative à l'ouest et touche toutes les stations (sauf la région de Saida). Au centre, la tendance à la baisse est moins importante qu'à l'Ouest. Tandis qu'à l'Est, toutes les stations ne présentent pas de rupture (sauf Bejaia et Texenna).

Les stations des hauts plateaux présentent une variation pluviométrique importante par rapport aux stations côtières.

La rupture saisonnière apparaît importante pendant l'hiver et influence la variation interannuelle des précipitations.

Pour plusieurs stations, surtout à l'est, les tests ont indiqué une tendance significative à l'augmentation des précipitations annuelles à partir de 2002.

Chapitre 7 : Analyse du régime pluviométrique par l'indice pluviométrique standardisé

Introduction

L'indice pluviométrique standardisé permet de classer les années sèches et humides. Dans notre travail l'utilisation du SPI à pour but principal la détermination des périodes sèches et humides pour quantifier la sévérité de la sécheresse.

7-1- Évolution de l'indice pluviométrique de certaines stations

Nous avons calculé le SPI annuel pour toutes les séries pluviométriques de la zone d'étude (annexes 06). Les graphes suivants montrent l'évolution du SPI pour quelques stations choisies, stationnaires et non stationnaires, réparties sur l'ensemble de la zone d'étude.

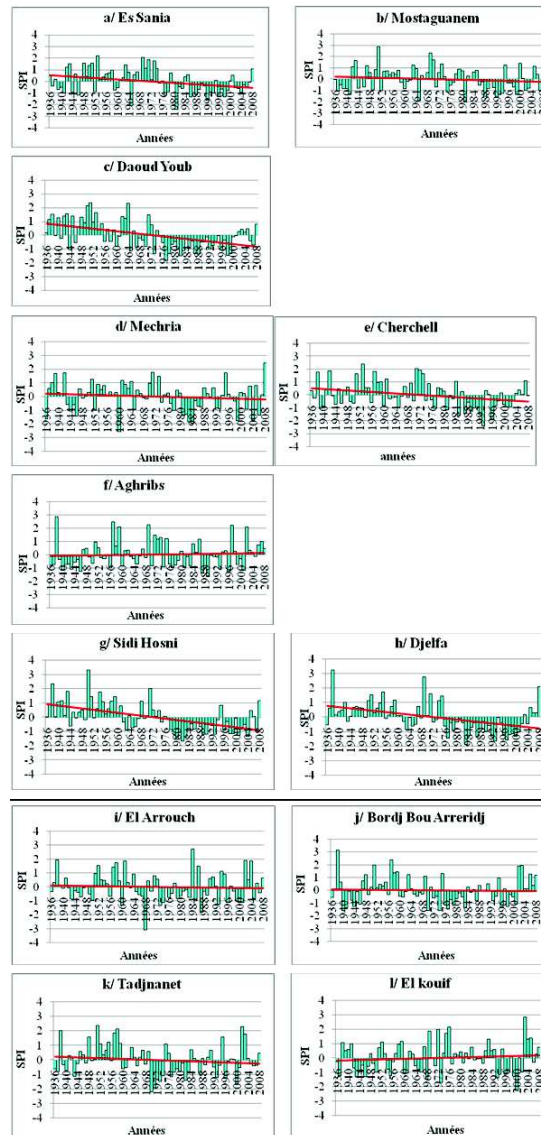


Figure 36 : Évolution de l'indice pluviométrique de certaines stations.

L'interprétation des graphes repose sur la classification du SPI. Un tableau récapitulatif du nombre d'années de chaque type de sécheresse est établi pour les différentes stations (tableau 08).

SPI	≥ 2	1,5-1,99	1-1,49	(-) 0,99- 0,99	(-) 1- (-) 1,49	(-) 1,50-(-) 1,99	$\leq (-) 2$
Etat de la sécheresse	Extrêmement humide	Très humide	Modérément humide	Près de la normale	Modérément sèche	Très sèche	Extrêmement sèche
Mostaganem	2	2	8	49	8	3	1
Es Sania	2	5	6	50	7	1	2
Daoud Youb	3	3	8	46	12	1	0
Mecheria	1	4	5	51	6	5	1
Cherchell	1	6	4	51	9	0	2
Aghribs	6	0	5	53	8	1	0
Sidi Hosni	3	2	8	48	10	2	0
Djelfa	3	3	5	50	9	3	0
BBA	2	3	8	47	10	3	0
El Arrouch	1	7	2	54	7	1	1
Tadjanet	4	4	4	50	7	3	1
El Kouif	2	3	6	49	11	1	1

Tableau 08 : Nombre d'années correspondant à chaque valeur du SPI pour chaque station durant la période 1936/1937-2008/2009.

Le tableau ci-dessus indique que le nombre d'années près de la normale ($-1 < SPI < 1$) est en moyenne de 50 ans (± 4) soit 68,5% de la période d'étude (73 ans). Les années humides ($SPI \geq 1$) représentent en moyenne 12 ans (± 2) soit 16,4%, et les années sèches ($SPI \leq -1$) 11 ans (± 3) soit 15,1%.

Ce n'est que la répartition chronologique des années humides, normales et sèches, qui détermine, en effet, le régime pluviométrique de chaque station et de chaque région.

D'après les graphes, nous constatons que toutes les stations ont connu des périodes ou des années sèches, même celles qui ne présentent pas de rupture, mais à des degrés de sévérité variable d'une station à l'autre (annexes 06).

A l'ouest de la zone d'étude, la station d'Es Sania (figure 36.a) a connu 2 années extrêmement sèches ; la première en 1965 qui est survenue au milieu d'une période humide, et la deuxième en 1981 qui annonce le début de la sécheresse. La plupart des années sèches apparaissent à partir de la moitié des années 70. Les années humides se trouvent avant cette date. On relève deux années extrêmement humides ($SPI > 2$), en 1953 et 1969. Selon le SPI, nous pouvons distinguer trois périodes, une période humide (1936-1975), suivie d'une période sèche (1976-1999), puis un retour vers la normale à partir de 2000 ($-1 < SPI < 1$).

La station de Mostaganem (figure 36.b) a connu elle, aussi, une année extrêmement sèche en 1981. Les années extrêmement humides se trouvent avant 1970 (1951, 1959). Comparée à la station d'Es Sania, la station de Mostaganem ne connaît pas de périodes longues de sécheresse ou d'humidité, de ce fait elle présente un régime pluviométrique régulier. Nous pouvons relever la succession de 3 années sèches ($-1,5 < SPI < -1$) de 1992, 1993, et 1994.

La station de Daoud Youb (figure 36.c) ne connaît pas d'années extrêmement sèches, par contre elle indique une baisse continue des précipitations à partir de 1976. De ce fait on distingue une période humide (1936-1975) caractérisée par trois années extrêmement humides (1950, 1951, 1964), une période sèche (1976-1999) puis un retour vers la normale à partir de 2000.

La station de Mecheria (figure 36.d) située sur les hauts plateaux Oranais, est stationnaire selon les tests de rupture. Par contre nous pouvons observer sur le graphe une légère baisse à partir de 1981, due à la succession de 4 années sèches. Les années 1999 et 2004 sont très sèches aussi. Une année extrêmement sèche est enregistrée en 1961 et une année extrêmement humide est enregistrée en 2008.

Au centre, la station de Cherchell (figure 36.e) indique une tendance à la baisse à partir de 1976. L'année extrêmement sèche est enregistrée en 1993. Deux années extrêmement humides sont enregistrées ; l'année 1951 et l'année 1971 qui est suivie de 2 années très humides. Un retour vers la normale est observé à partir de 2003.

La station d'Aghribs (figure 36.f) qui se trouve dans la région la plus arrosée du Nord Algérien indique une régularité du régime pluviométrique. 4 années extrêmement humides sont observées avant 1970 (1938, 1957, 1959, 1969) et 2 autres années sont observées en 1997 et 2002. Nous constatons aussi l'absence d'années extrêmement sèches et très sèches à l'exception de 1989 (SPI= - 1,7).

Sur le Cheliff, la station de Sidi Hosni (figure 36.g) indique une diminution des précipitations à partir de 1976. Les années 1938, 1950 et 1971 ont été extrêmement humides. Toutes les années sèches et très sèches ($-2 < \text{SPI} < -1$) sont observées après 1976. L'année 2005 peut être le début d'un retour vers la normale.

La station de Djelfa (figure 36.h) a connu elle aussi une baisse continue des précipitations à partir de 1976, caractérisée par trois années très sèches ($-2 < \text{SPI} < -1,5$) en 1983, 1993, et 1997. Trois années extrêmement humides sont enregistrées en 1938, 1969 et 2008. Un retour vers la normale est observé à partir de 2002.

A l'est de la zone d'étude, la station d'El Harrouch (figure 36.i) indique une régularité du régime pluviométrique. Une année extrêmement sèche en 1968 et une année extrêmement humide en 1984 sont observées. 7 années ont été très humides 1938, 1952, 1957, 1961, 1986, 2002, et 2004.

La station de Bordj Bou Arreridj (figure 36.j) présente elle aussi une régularité du régime pluviométrique. Le SPI indique deux années extrêmement humides en 1938 et 1957 et deux années très humides en 2002 et 2003. Les années 1940, 1970, 1974 ont été très sèches.

La station de Tadjanet (figure 36.k) est caractérisée par une année extrêmement sèche en 1971 qui indique le début d'une période sèche. Les années 1951, 1957 et 2002 sont extrêmement humides.

La station d'El Kouif est stationnaire (figure 36.l). Elle est caractérisée par une année extrêmement sèche en 2000 et deux années extrêmement humides en 1976 et 2003. Les années 1969 et 1972 sont très humides et 1973 est très sèche.

Les résultats obtenus par l'indice pluviométrique, ont permis de ressortir trois périodes distinctes :

- période I : 1936- 1975
- période II : 1976-2001
- période III : 2002-2008

Le tableau ci-dessous illustre les moyennes pluviométriques des trois périodes ainsi que leur taux de variation par rapport à la moyenne interannuelle de la période de référence 1936/1937-2008/2009.

SPI	≥ 2	1,5-1,99	1-1,49	(-) 0,99- 0,99	(-) 1- (-) 1,49	(-) 1,50-(-) 1,99	$\leq (-) 2$
Etat de la sécheresse	Extrêmement humide	Très humide	Modérément humide	Près de la normale	Modérément sèche	Très sèche	Extrêmement sèche
Mostaganem	2	2	8	49	8	3	1
Es Sania	2	5	6	50	7	1	2
Daoud Youb	3	3	8	46	12	1	0
Mecheria	1	4	5	51	6	5	1
Cherchell	1	6	4	51	9	0	2
Aghribs	6	0	5	53	8	1	0
Sidi Hosni	3	2	8	48	10	2	0
Djelfa	3	3	5	50	9	3	0
BBA	2	3	8	47	10	3	0
El Arrouch	1	7	2	54	7	1	1
Tadjanet	4	4	4	50	7	3	1
El Kouif	2	3	6	49	11	1	1

Tableau 09 : Moyennes pluviométriques des trois périodes.

Dans l'ensemble, la période 1936-1975 est excédentaire pour toutes les stations, excepté celle d'El Kouif qui enregistre un déficit de 2,5%. Toutes les stations ont connu une baisse des précipitations durant la période déficitaire (1976-2001), mais avec des taux différents d'Ouest en Est. La période 2002-2008 est caractérisée par une augmentation des précipitations, mise à part la station de Sidi Hosni où les précipitations sont légèrement en dessous de la moyenne interannuelle.

Nous constatons bien que les excédents et les déficits pluviométriques sont différents d'une station à une autre. Les stations stationnaires dont le régime pluviométrique est régulier, affichent des excédents pluviométriques qui ne dépassent pas 7% pendant la période excédentaire. Ces excédents sont nettement supérieurs pour les autres stations (non stationnaires).

La période déficitaire a beaucoup marqué les stations présentant une rupture. Le déficit pluviométrique atteint environ 40% à Djelfa. Les stations de Sidi Hosni et Daoud Youb situées sur les hauts plateaux à l'Ouest, indiquent elles aussi une baisse importante des précipitations d'environ 30%. Tandis que les stations côtières d'Oran et Cherchell enregistrent respectivement un déficit d'environ 14% et 20%.

La période 2002-2008, peut être une période excédentaire pour certaines stations, et un retour vers la normale pour d'autres. Les stations situées sur la partie Orientale de la zone d'étude enregistrent des excédents importants qui dépassent 13% et peuvent atteindre 22% à Bordj Bou Arreridj et El Kouif. Alors que, cette augmentation n'atteint pas 0,5% à Cherchell et Mechria. Elle est d'environ 2% à Mostaganem et 7% à Es Sania.

La période 2002-2008 est très déterminante, elle nous incite à poser certaines questions :

- Est-ce la fin de la sécheresse?
- Assiste-t-on à une tendance vers l'augmentation des précipitations ?
- Ou s'agit-il juste d'une courte période humide qui vient au milieu d'une longue période de sécheresse ?

La réponse à ces questions n'est pas aussi simple. Car, comme nous l'avons déjà vu, le Nord Algérien ne réagit pas de la même manière d'Ouest en Est, vis-à-vis des perturbations météorologiques. Les années à venir seront donc déterminantes. Néanmoins, ce qui est

sûr, c'est que tout le Nord Algérien connaît actuellement un retour vers la normale voire une augmentation des précipitations.

7-2- Variation de l'indice pluviométrique au Nord Algérien

Une représentation des valeurs du SPI, de toute la zone d'étude, a été effectuée en fonction de la longitude et de la latitude

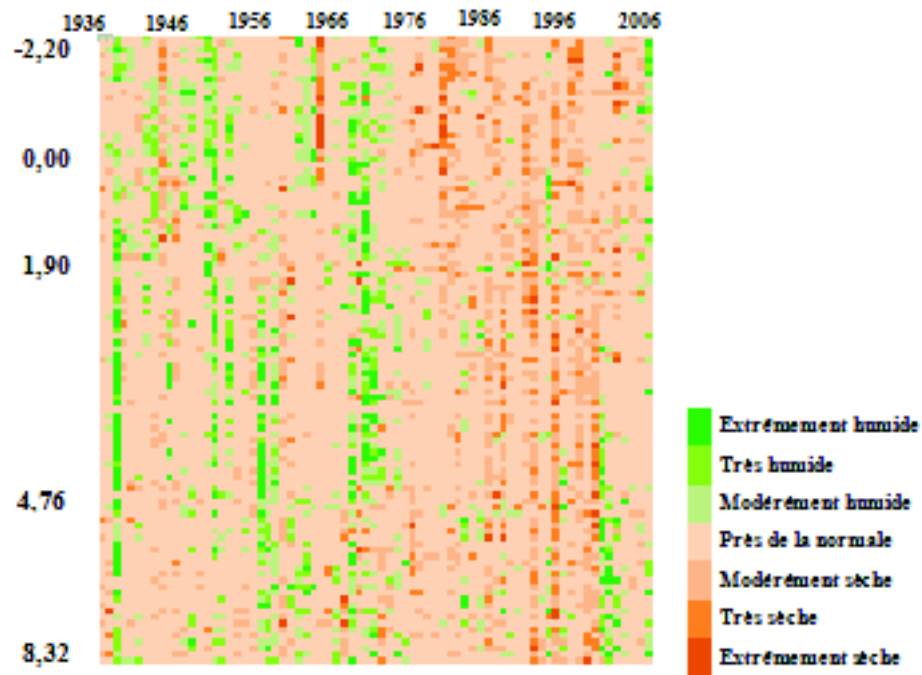


Figure 37 : Visualisation des valeurs du SPI en fonction de la longitude des postes pluviométriques.

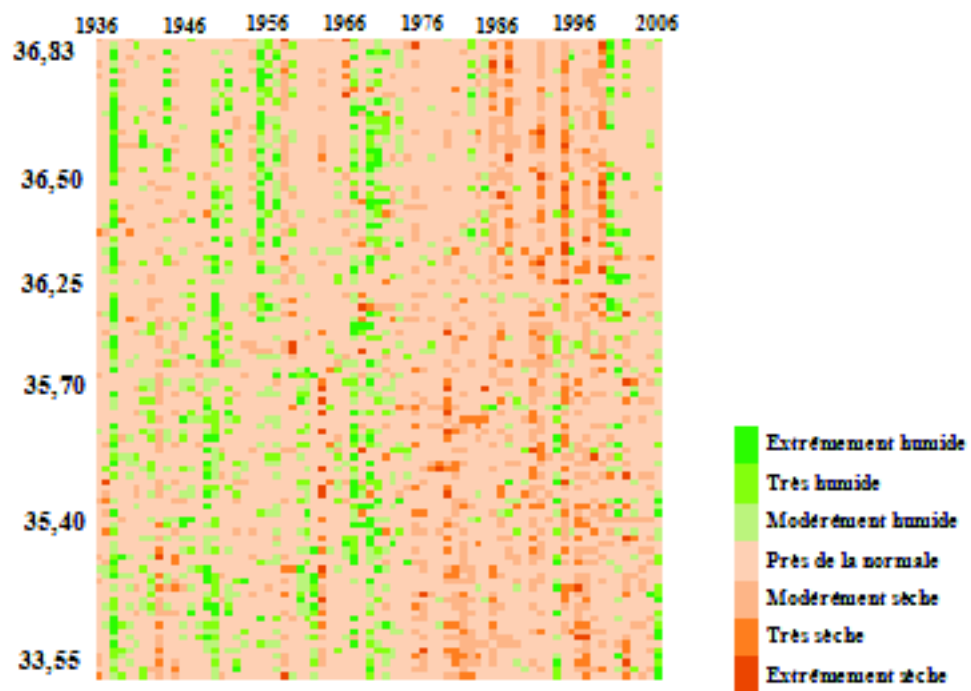


Figure 38 : Visualisation des valeurs du SPI en fonction de la latitude des postes pluviométriques.

Nous avons établi aussi une cartographie des périodes excédentaires et déficitaires en fonction de la latitude et de la longitude.



Figure 39 : Visualisation des périodes excédentaires et déficitaires en fonction de la longitude des postes pluviométriques.



Figure 40 : Visualisation des périodes excédentaires et déficitaires en fonction de la latitude des stations pluviométriques

En fonction de la longitude (d'ouest en est), nous constatons que les périodes excédentaires sont concentrées avant 1976 (figure 39). Sur cette période (1936-1976) nous pouvons observer l'alternance d'années excédentaires et normales, ainsi que quelques zones ponctuelles sèches concentrées plus à l'ouest (entre $-2,20^{\circ}$ et $1,90^{\circ}$).

La décennie 1936-1946 a été vraiment excédentaire à l'ouest comparée au centre (entre $1,90^{\circ}$ et $4,76^{\circ}$) et à l'est (entre $4,76^{\circ}$ et $8,32^{\circ}$) de la zone d'étude. L'année 1938 est très humide surtout au centre ($SPI > 1,5$), 1944 est très sèche à l'ouest ($SPI < -1,5$) alors qu'elle est normale au centre et à l'est (figure 37). Les deux années 1942 et 1943 sont plus excédentaires à l'ouest ($1 < SPI < 1,5$).

La deuxième décennie (1946-1956) est caractérisée par deux années très humides 1950 et 1951 surtout à l'ouest et au centre. Nous pouvons relever certaines zones ponctuelles sèches mais pas aussi importantes, telle que l'année 1956 au centre.

La décennie (1956-1966) est plus excédentaire à l'est, les années 1957, 1958 et 1959 sont très humides au centre et à l'est ($SPI > 1,5$) tandis qu'elles sont normales à l'ouest. L'année 1965 apparaît déficitaire à l'ouest, elle peut être extrêmement sèche dans certaines zones ($SPI \leq -2$).

La quatrième décennie (1966-1976), se trouve plus excédentaire à l'ouest et au centre, contrairement à l'est où nous pouvons observer certaines zones déficitaires, de 1960 à 1963.

La décennie (1976-1986) semble annoncer le début de sécheresse sur la partie Ouest de la zone d'étude. Cette période est caractérisée par des années très sèches voir même extrêmement sèche ($SPI < -1,5$) à l'ouest, où l'on relève la succession d'années sèches entre 1981 et 1984.

Cette sécheresse est moins prononcée au centre et à l'est du Nord Algérien, elle commence à devenir sévère à partir de 1986. Les années 1987, 1988, 1992 et 1993 ont été déficitaires sur l'ensemble du pays. Les années 1992 et 1993 ont été marquées par une sécheresse sévère au centre de la zone d'étude. Cette sécheresse se poursuit jusqu'en 2001 (1996-2001), les années 1998, 1999, 2000 et 2001 ont connu aussi un déficit pluviométrique important. Les années 1998 et 1999 ont été très sèches à l'ouest ($SPI < -1,5$), cette même sévérité est marquée au centre pendant les années 2000 et 2001 ($SPI < -1,5$) et un peu moins à l'est du pays ($-1,5 < SPI < -1$).

À partir de 2002, des zones excédentaires apparaissent à l'est de la zone d'étude ($SPI > 1,5$), tandis qu'à l'ouest on relève toujours des zones déficitaires entre 2002 et 2006, ces zones sont moins importantes au centre qui est caractérisé par des années normales. L'année hydrologique 2008/2009 caractérisée par un excédent pluviométrique, a marqué l'ensemble de la zone d'étude surtout l'ouest où le SPI dépasse 1,5.

En fonction de la latitude (du Nord au sud), nous constatons que les quatre premières décennies (1936-1976) ont connu des périodes bien excédentaires (figure 40), marquées surtout pendant la décennie (1966-1976) (figure 38). Les périodes déficitaires ($SPI < -1$) apparaissent entre 1976 et 1986 sur les hauts plateaux (sud de la zone d'étude), alors que le littoral est caractérisé par des périodes normales avec quelques zones ponctuelles humides en 1984 et 1986 ($SPI > 1$).

A partir de 1987, le littoral a connu des périodes déficitaires plus accentuées ($SPI < -1,5$), les années 1987, 1989, 1993, et 1996 ont été très sèches voir extrêmement sèches dans certaines régions du littoral. Plus au sud, ces années sont moins déficitaires et nous pouvons observer quelques zones ponctuelles humides en 1989, 1990 et 1995 ($SPI > 1,5$). La période déficitaire 1997-2001 est marquée beaucoup plus au sud de la zone d'étude (les hauts plateaux), surtout les années 1998 et 1999 ($SPI < -1,5$).

Au nord ce sont les années 1999 et 2001 qui sont très sèches. La période 2002-2008 est caractérisée par des années normales sur tout le nord de la zone d'étude, l'année 2002 est très humide ($SPI > 1,5$), et on relève certaines zones ponctuelles humides en 2004, 2007 et 2008. Au sud, cette période reste légèrement marquée par des déficits pluviométriques surtout en 2004 et 2006, alors que 2008 est excédentaire sur toute la région des hauts plateaux ($SPI > 1,5$).

Conclusion

L'indice pluviométrique est un outil très intéressant pour caractériser les années sèches et les années humides. De ce fait, il met en évidence la répartition temporelle de ces années.

Le SPI fait ressortir deux périodes bien distinctes ; une période excédentaire (1936-1975), suivie d'une période déficitaire (1976-2001), la décennie 1966-1976 apparaît la plus excédentaire et la décennie 1986-1996 la plus déficitaire. La période (2002-2008), apparaît comme excédentaire à l'est du Nord Algérien, par contre, elle indique un retour vers la normale à l'ouest et au centre de la zone d'étude.

L'utilisation de l'indice pluviométrique a montré que toutes les stations (avec et sans rupture) ont subi une baisse de la pluviométrie durant la période déficitaire. Cette baisse apparaît plus importante pour les stations non stationnaires, puisque les années sèches se trouvent concentrées dans la deuxième période. Contrairement aux stations stationnaires, qui présentent, quant à elles, une alternance homogène entre les années humides et les années sèches.

chapitre 8 : Analyse des pluies journalières par les chaînes de Markov

Introduction

Afin d'étudier la variation des précipitations à l'échelle journalière nous avons opté pour la méthode des chaînes de Markov qui permet de déterminer la probabilité conditionnelle et inconditionnelle des jours secs et humides. Pour cela nous n'avons pu récolter que cinq postes pluviométriques auprès de l'ONM qui correspondent à la période d'étude 1936/1937-2008/2009 ; les stations d'Alger, Annaba et Constantine qui ne présentent pas de rupture et les stations d'Oran et Chleff qui présentent une tendance à la baisse des précipitations.

8-1- Chaînes de Markov pour la période d'étude 1936/1937-2008/2009

Sur la base des données journalières disponibles, nous avons construit les chaînes de Markov en considérant les jours secs et les jours pluvieux définies par un seuil de 0,1mm.

Les matrices de probabilités de transition des chaînes de Markov d'ordre 0,1 et 2 ont été calculées pour :

- une saison (année hydrologique),
- deux saisons ; saison humide (septembre-avril) et saison sèche (mai-août) ;
- quatre saisons (automne, hiver, printemps, été).

Tableau 10 : Chaînes de Markov pour une saison (1936-2008).

Stations	Période	Saison	Ordre 0		Ordre 1		Ordre 2	
			P ₀	P ₁	P ₀₀	P ₁₁	P ₀₀₀	P ₁₁₁
Alger	1936-2008	1	0,76	0,24	0,86	0,55	0,87	0,57
Oran	1936-2008	1	0,82	0,18	0,89	0,51	0,90	0,49
Annaba	1936-2008	1	0,72	0,28	0,83	0,58	0,85	0,59
Constantine	1936-2008	1	0,74	0,27	0,83	0,53	0,84	0,54
Chleff	1936-2008	1	0,80	0,20	0,48	0,52	0,90	0,52

P₀ : probabilité inconditionnelle d'avoir un jour sec

P₁ : probabilité inconditionnelle d'avoir un jour pluvieux

P₀₀ : probabilité conditionnelle de succession de deux jours secs

P₁₁ : probabilité conditionnelle de succession de deux jours humides

P₀₀₀ : probabilité conditionnelle de succession de trois jours secs

P₁₁₁ : probabilité conditionnelle de succession de trois jours humides

Les chaînes de Markov d'ordre 0, d'ordre 1 et d'ordre 2 pour une saison indiquent que les probabilités conditionnelles et inconditionnelles sont plus importantes pour les jours secs que pluvieux. Cette différence apparaît encore plus pour l'ordre 0. La probabilité des

jours secs est plus importante à Oran, alors que la probabilité des jours pluvieux est plus importante à Annaba.

Tableau 11 : Chaines de Markov pour deux saisons (1936-2008).

Stations	Période	Saisons	Ordre 0		Ordre 1		Ordre 2	
			P ₀	P ₁	P ₀₀	P ₁₁	P ₀₀₀	P ₁₁₁
Alger	1936-2008	1	0,72	0,28	0,84	0,59	0,85	0,60
	1936-2008	2	0,84	0,16	0,90	0,44	0,91	0,42
Oran	1936-2008	1	0,79	0,21	0,87	0,53	0,89	0,51
	1936-2008	2	0,87	0,13	0,92	0,45	0,93	0,43
Annaba	1936-2008	1	0,67	0,34	0,80	0,61	0,82	0,61
	1936-2008	2	0,82	0,18	0,89	0,47	0,89	0,46
Constantine	1936-2008	1	0,70	0,30	0,81	0,56	0,82	0,57
	1936-2008	2	0,80	0,20	0,86	0,44	0,88	0,46
Chleff	1936-2008	1	0,77	0,23	0,87	0,55	0,88	0,54
	1936-2008	2	0,87	0,13	0,91	0,44	0,92	0,44

Les chaines de Markov pour deux saisons, révèlent que les probabilités conditionnelles de la saison humide sont importantes que celles de la saison sèche quand les jours sont pluvieux, alors que les probabilités conditionnelles des jours secs sont plus importantes en saison sèche.

Nous constatons que les chaines de Markov d'ordre 1 et d'ordre 2 donnent pratiquement le même résultat.

Tableau 12 : Chaines de Markov pour quatre saisons (1936-2008).

Stations	période	Saisons	Ordre 0		Ordre 1		Ordre 2	
			P ₀	P ₁	P ₀₀	P ₁₁	P ₀₀₀	P ₁₁₁
Alger	1936-2008	1	0,84	0,16	0,90	0,46	0,90	0,51
	1936-2008	2	0,63	0,37	0,78	0,62	0,80	0,63
	1936-2008	3	0,68	0,32	0,80	0,59	0,82	0,57
	1936-2008	4	0,89	0,11	0,92	0,37	0,93	0,35
Oran	1936-2008	1	0,89	0,11	0,93	0,41	0,93	0,41
	1936-2008	2	0,72	0,28	0,83	0,54	0,84	0,52
	1936-2008	3	0,75	0,25	0,85	0,56	0,87	0,52
	1936-2008	4	0,91	0,09	0,94	0,38	0,94	0,34
Annaba	1936-2008	1	0,80	0,20	0,87	0,48	0,88	0,51
	1936-2008	2	0,56	0,44	0,72	0,65	0,74	0,64
	1936-2008	3	0,64	0,36	0,78	0,61	0,80	0,59
	1936-2008	4	0,87	0,13	0,91	0,40	0,92	0,40
Constantine	1936-2008	1	0,81	0,19	0,86	0,43	0,87	0,47
	1936-2008	2	0,63	0,37	0,77	0,60	0,78	0,61
	1936-2008	3	0,66	0,35	0,77	0,57	0,78	0,54
	1936-2008	4	0,85	0,15	0,89	0,38	0,90	0,39
Chleff	1936-2008	1	0,89	0,11	0,92	0,41	0,93	0,42
	1936-2008	2	0,70	0,30	0,81	0,57	0,83	0,55
	1936-2008	3	0,73	0,27	0,84	0,16	0,85	0,54
	1936-2008	4	0,91	0,09	0,94	0,36	0,94	0,39

Pour quatre saisons, les chaînes de Markov mettent en évidence que l'hiver est la saison la plus pluvieuse de l'année, suivie du printemps. Les probabilités conditionnelles d'ordre 1 et 2 sont presque identiques.

8-2- Chaînes de Markov pour les trois périodes (1936-1975) (1976-2001) (2002-2008)

Une analyse de l'occurrence des pluies journalières des trois périodes (déterminées par l'indice pluviométrique) est établie par les modèles markoviens et pour différentes saisons.

Pour une saison, les résultats ne montrent aucune différence significative des probabilités conditionnelles et inconditionnelles entre les trois périodes. Nous pouvons relever une légère baisse des probabilités pendant la deuxième période (1975-2001) à Chleff et Oran.

Tableau 13 : Chaînes de Markov pour une saison pour les trois périodes.

Stations	Périodes	Saisons	Ordre 0		Ordre 1		Ordre 2	
			P ₀	P ₁	P ₀₀	P ₁₁	P ₀₀₀	P ₁₁₁
Alger	1936-1975	1	0,75	0,25	0,86	0,56	0,87	0,57
	1976-2001	1	0,77	0,23	0,86	0,54	0,87	0,56
	2002-2008	1	0,75	0,26	0,85	0,56	0,86	0,57
Annaba	1936-1975	1	0,73	0,27	0,84	0,57	0,85	0,58
	1976-2001	1	0,71	0,29	0,83	0,59	0,85	0,59
	2002-2008	1	0,70	0,30	0,83	0,61	0,85	0,61
Constantine	1936-1975	1	0,73	0,27	0,83	0,52	0,84	0,53
	1976-2001	1	0,74	0,26	0,83	0,52	0,85	0,53
	2002-2008	1	0,74	0,26	0,84	0,56	0,85	0,59
Chleff	1936-1975	1	0,79	0,21	0,88	0,53	0,89	0,54
	1976-2001	1	0,82	0,18	0,89	0,50	0,90	0,49
	2002-2008	1	0,79	0,21	0,88	0,54	0,89	0,55
Oran	1936-1975	1	0,81	0,19	0,89	0,52	0,90	0,50
	1976-2001	1	0,82	0,18	0,89	0,49	0,90	0,47
	2002-2008	1	0,82	0,18	0,89	0,50	0,90	0,53

Les chaînes de Markov pour deux saisons n'indiquent aussi aucune différence entre les probabilités des périodes humides et sèches des trois périodes.

Tableau 14 : Chaînes de Markov pour deux saisons pour les trois périodes.

Stations	Périodes	Saisons	Ordre 0		Ordre1		Ordre2	
			P ₀	P ₁	P ₀₀	P ₁₁	P ₀₀₀	P ₁₁₁
Alger	1936-1975	1	0,71	0,29	0,84	0,60	0,86	0,61
	1936-1975	2	0,84	0,16	0,89	0,43	0,90	0,39
	1976-2001	1	0,73	0,27	0,83	0,56	0,85	0,58
	1976-2001	2	0,85	0,16	0,90	0,46	0,91	0,47
	2002-2008	1	0,69	0,31	0,82	0,59	0,83	0,59
	2002-2008	2	0,86	0,15	0,90	0,43	0,91	0,45
Annaba	1936-1975	1	0,67	0,33	0,80	0,60	0,83	0,60
	1936-1975	2	0,84	0,16	0,89	0,44	0,90	0,44
	1976-2001	1	0,66	0,34	0,80	0,61	0,82	0,62
	1976-2001	2	0,81	0,19	0,88	0,49	0,89	0,46
	2002-2008	1	0,64	0,36	0,797	0,63	0,82	0,62
	2002-2008	2	0,82	0,19	0,89	0,52	0,89	0,52
Constantine	1936-1975	1	0,70	0,30	0,80	0,55	0,82	0,56
	1936-1975	2	0,80	0,20	0,86	0,43	0,88	0,42
	1976-2001	1	0,71	0,29	0,82	0,55	0,83	0,55
	1976-2001	2	0,80	0,20	0,86	0,45	0,87	0,48
	2002-2008	1	0,70	0,30	0,82	0,58	0,88	0,48
	2002-2008	2	0,81	0,19	0,82	0,61	0,89	0,52
Chleff	1936-1975	1	0,76	0,24	0,86	0,56	0,88	0,56
	1936-1975	2	0,86	0,14	0,91	0,43	0,92	0,43
	1976-2001	1	0,79	0,21	0,87	0,51	0,89	0,50
	1976-2001	2	0,88	0,13	0,92	0,46	0,93	0,44
	2002-2008	1	0,75	0,25	0,85	0,56	0,87	0,57
	2001-2008	2	0,87	0,13	0,92	0,44	0,93	0,46
Oran	1936-1975	1	0,78	0,22	0,87	0,54	0,89	0,52
	1936-1975	2	0,87	0,13	0,92	0,45	0,93	0,42
	1976-2001	1	0,80	0,20	0,88	0,51	0,89	0,48
	1976-2001	2	0,87	0,13	0,92	0,45	0,92	0,44
	2002-2008	1	0,78	0,22	0,87	0,53	0,88	0,56
	2002-2008	2	0,89	0,12	0,92	0,39	0,93	0,37

Les chaînes de Markov pour quatre saisons (annexes 07) mettent en évidence que l'hiver est le plus pluvieux. À Chleff et Oran nous pouvons relever une légère baisse des probabilités conditionnelles en hiver pendant la deuxième période (1976-2001), ceci confirme les résultats obtenus par les tests de rupture à l'échelle saisonnière.

Conclusion

Nous pouvons dire que les chaînes de Markov n'ont relevé aucun changement significatif des probabilités conditionnelles et inconditionnelles d'une période à l'autre et pour les différentes saisons. Nous déduisons, alors, que la baisse des précipitations durant la deuxième période (1976-2001), n'est pas due à un décalage saisonnier (ou perturbation saisonnière) mais tout simplement à la baisse de la quantité des précipitations surtout durant l'hiver.

chapitre 9 : Analyse du régime pluviométrique par l'analyse en composantes principales

Introduction

À travers l'analyse en composantes principales une régionalisation de la zone d'étude sera effectuée à l'échelle annuelle ensuite à l'échelle saisonnière. Une régionalisation selon les trois périodes 1936-1975, 1976-2001 et 2002-2008 sera établie aussi. Ce découpage régional mettra en relief les différentes variations ou comportements pluviométriques à l'échelle du temps et de l'espace.

9-1- Analyse en composantes principales à l'échelle annuelle

Afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude, nous avons appliqué l'analyse en composantes principales (ACP) à l'échelle annuelle.

Tableau 15 : Résultats de l'ACP sans rotation et après rotation varimax.

% de variance des Cp sans rotation				
Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	42,0	12,5	6,2	3,6
% cumulé	42,0	54,6	60,7	64,3
% de variance des Cp après rotation varimax				
% variance	20,4	16,3	12,9	14,7
% cumulé	20,4	36,7	49,6	64,3

Les résultats de l'ACP avec et sans rotation indiquent que les quatre premières composantes représentent une part importante de la variance totale (64,3%).

L'ACP sans rotation montre que la première composante explique 42,0% de la variance ; elle décrit la variabilité interannuelle des précipitations pour l'ensemble de la zone d'étude (figure 42), de ce fait elle met en évidence l'homogénéité spatiale des régimes pluviométriques (par région). Toutes les stations sont corrélées positivement avec cette composante avec un coefficient de corrélation variant entre 0,31 et 0,87. Les coefficients les plus forts sont enregistrés dans le centre de la zone d'étude.

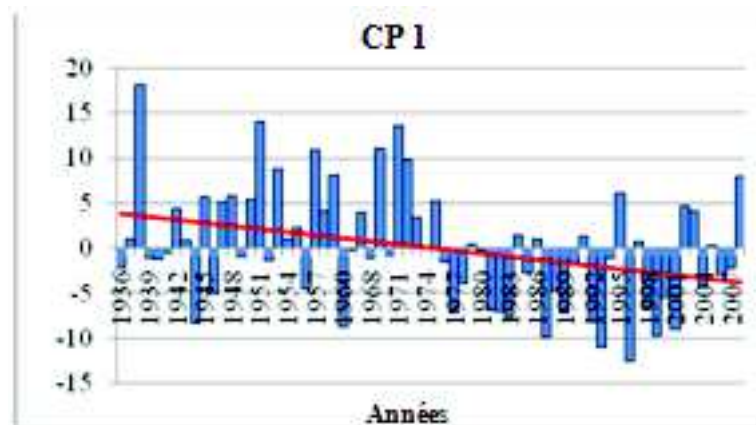


Figure 41 : Chronique temporelle de la première composante sans rotation.

La chronique associée à la première composante met en évidence des années particulièrement humides (1938, 1951, 1971) et la succession de plusieurs années particulièrement sèches que la plupart des stations ont connu. Cette chronique présente une tendance à la baisse à partir de 1976 avec quelques années humides en 1995, 2002, 2003 et 2008. Le coefficient de détermination est assez significatif de 0,119. Ceci confirme bien, le résultat trouvé par les tests de rupture et l'indice pluviométrique dans les chapitres précédents.

Les composantes suivantes expliquent des parts faibles de la variance. La deuxième composante n'explique que 12,5% de la variance (tableau 15); elle oppose la partie Nord Est de la zone d'étude (corrélées positivement avec la deuxième composante) (forte pluviosité) à la partie Nord Ouest (corrélées négativement) (faible pluviosité) (figure 43). La troisième composante explique 6,2% de la variance, elle oppose la zone littorale (stations côtières) à la zone des hauts plateaux ; cette composante explique le degré de variabilité de la pluviométrie selon un axe Nord-Sud, représenté par le coefficient de variation. Les régions corrélées positivement avec cette composante sont celles dont le coefficient de variation est le plus élevé alors que les régions corrélées négativement sont celles dont le coefficient de variation est le plus faible (figure 44). La quatrième composante, expliquant 3,6% de la variance totale ne montre pas de structure spatiale claire (figure 45).

Les résultats de l'ACP sans rotation, ont montré que seule la première composante explique un pourcentage assez important de la variance totale. Toutefois, les stations ne sont pas toutes décrites significativement par cette composante. Pour cela, nous avons effectué une rotation des axes factoriels selon la méthode varimax. Ce type de rotation a pour effet de diminuer la généralité de la première composante principale. Elle simplifie la structure de la solution en maximisant la variance des coefficients de corrélation des composantes.

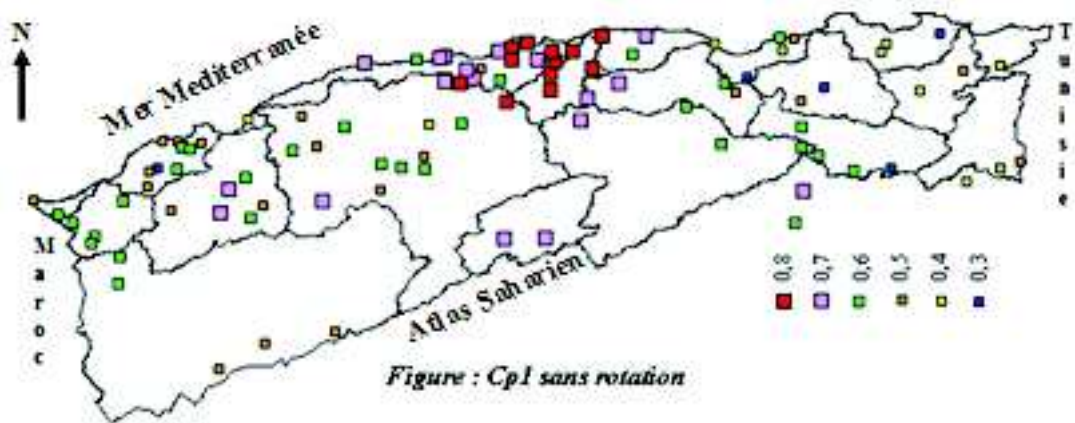


Figure 42 : cp1 sans rotation.



Figure : CP2 sans rotation

Figure 43 : cp2 sans rotation.



Figure 44 : cp3 sans rotation.

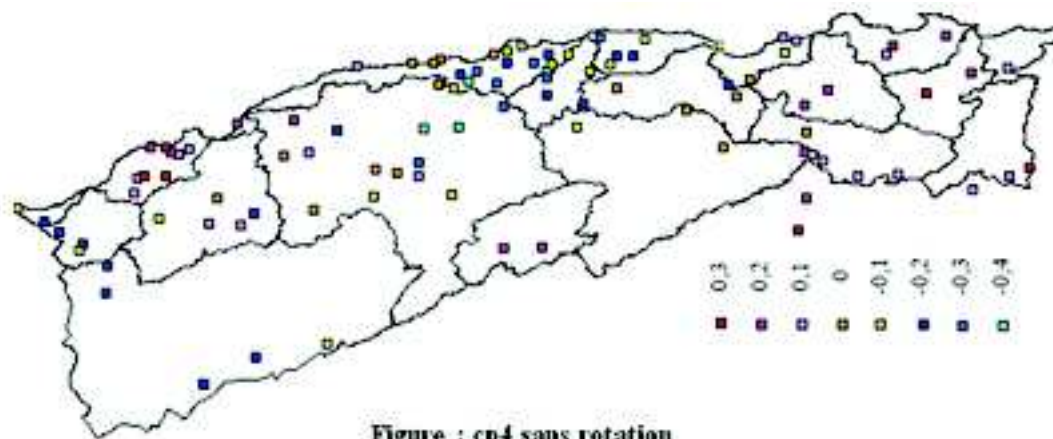


Figure : cp4 sans rotation

Figure 45 : cp4 sans rotation.

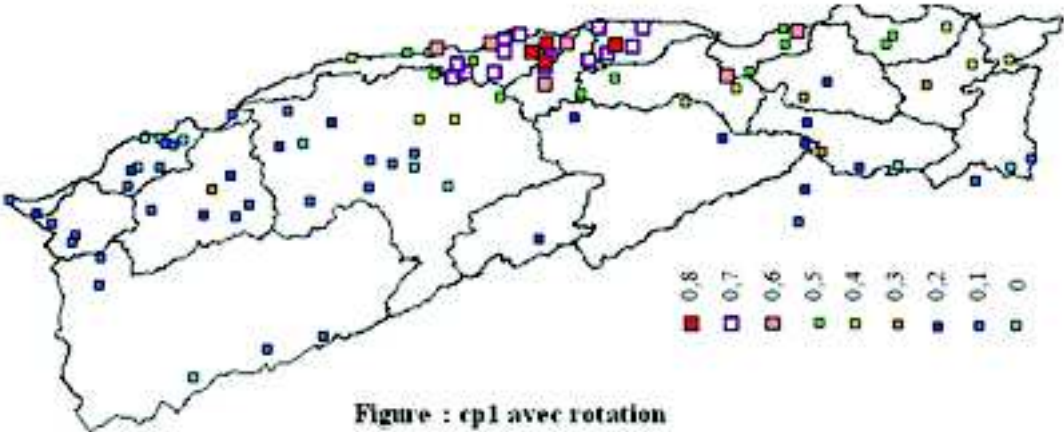


Figure : cp1 avec rotation

Figure 46 : cp1 avec rotation.



Figure 47 : cp2 avec rotation.

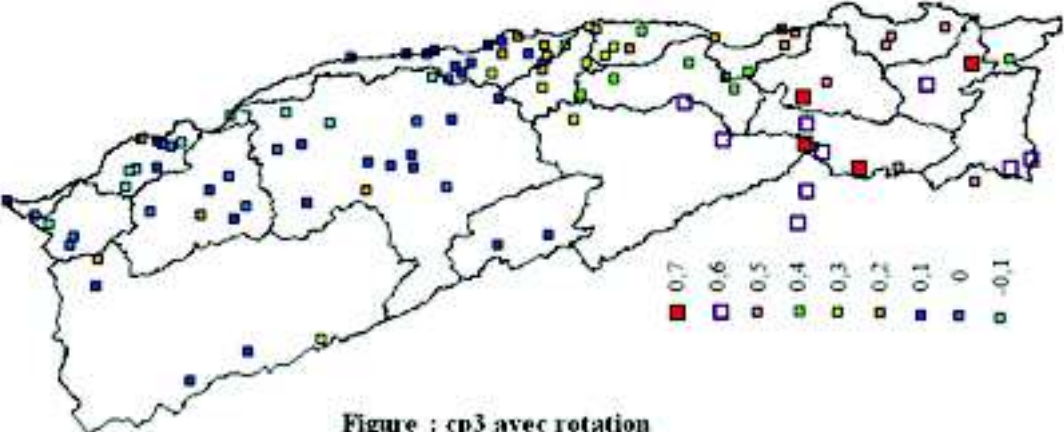


Figure : cp3 avec rotation

Figure 48 : cp3 avec rotation.

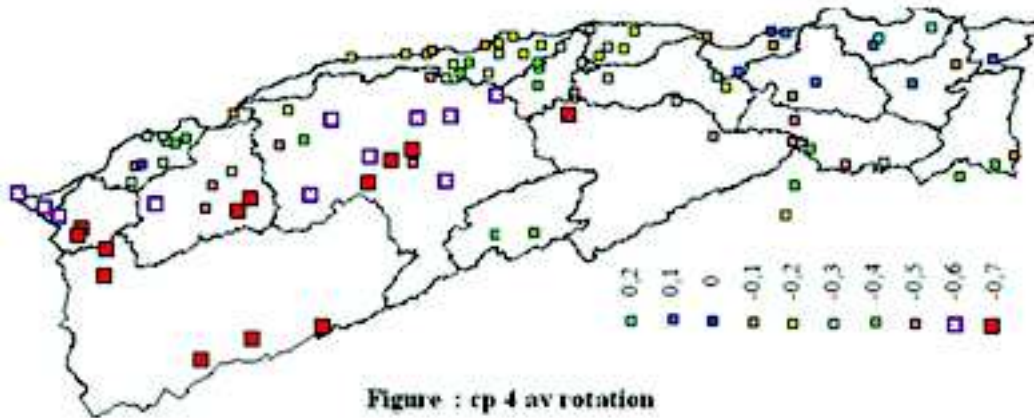


Figure : cp 4 av rotation

Figure 49 : cp4 avec rotation.

Pour l'ACP avec rotation varimax, nous avons retenu les quatre premières composantes expliquant 64,3% de la variance. Le pourcentage de variance expliqué par les valeurs propres est différent de celui de l'ACP sans rotation avec un pourcentage moins important sur la première composante, mais des valeurs plus importantes pour les valeurs propres suivantes (tableau 15). La quatrième composante présente une variance expliquée légèrement supérieure à celle de la troisième composante et proche de celle de la deuxième composante.

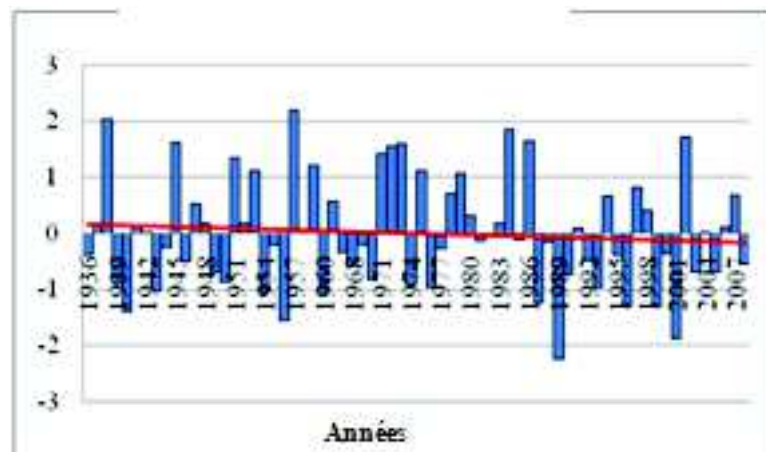


Figure 50 : Chronique temporelle de la première composante après rotation varimax.

La première composante explique 20,4% de la variance, les coefficients de corrélation varient entre 0 et 0,8. Les coefficients les plus élevés sont marqués au centre, région la plus arrosée de la zone d'étude (côtier algérois). L'Ouest étant caractérisé par un faible relief et une faible pluviométrie, il présente un coefficient de corrélation inférieur à 0,2 (figure 46). L'analyse de la chronique temporelle associée à la première composante (figure 50) indique une évolution presque identique à celle décrite par la première composante de l'ACP sans rotation, avec des excédents et des déficits moins accentués.

La tendance à la décroissance est moins importante avec un coefficient de détermination proche de zéro. Deux périodes sèches sont observées, une de 1962 à 1970 et l'autre plus importante marquée à partir de 1986 (avec un minimum absolu en 1989) interceptée par quelques années humides (1994, 1997, 1998, 2002 et 2007).

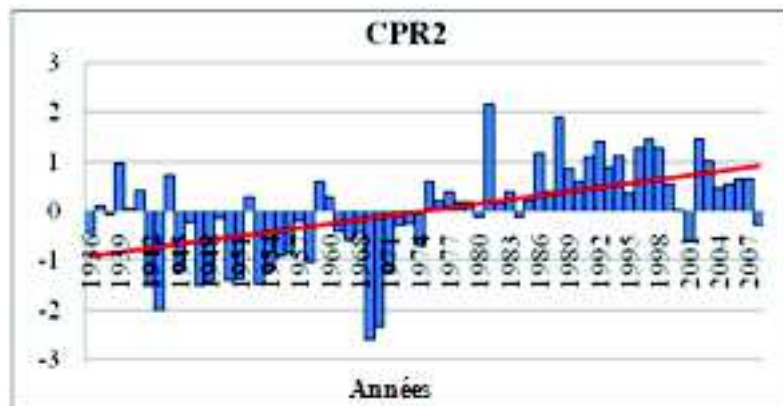


Figure 51 : Chronique temporelle de la deuxième composante après rotation varimax.

La deuxième composante oppose le littoral Ouest fortement corrélé négativement et le littoral Est (faible corrélation positive). Sur le graphe, les deux années 1942-1943 et 1943-1944 apparaissent déficitaires (figure 51) alors qu'en réalité ces années sont très excédentaires à l'ouest, ceci est expliqué par la corrélation négative avec cette composante. Les périodes 1945-1951 et 1953-1958 sont aussi excédentaires à l'est mais encore plus à l'ouest et la période 1961-1974 est plus excédentaire à l'Est. La période 1986-2000 a été totalement déficitaire et a connu une baisse importante de la pluviométrie à l'Ouest. La période 2002-2007 est excédentaire seulement à l'Est et l'année hydrologique 2008-2009 et excédentaire à l'Est et à l'Ouest.

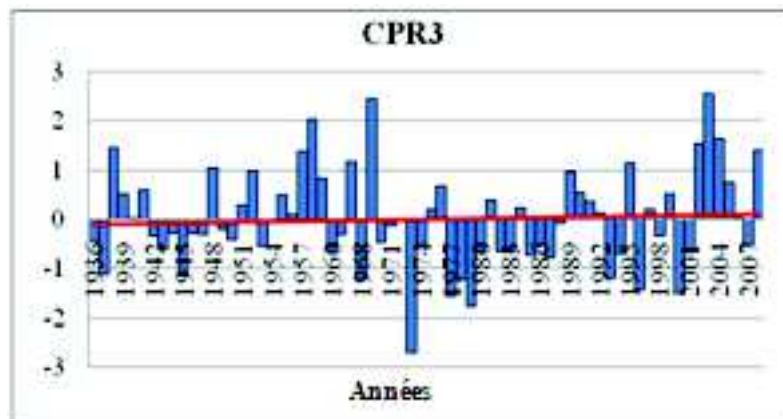


Figure 52 : Chronique temporelle de la troisième composante après rotation varimax.

La troisième composante caractérise la région des hauts plateaux Est corrélée positivement. La chronique temporelle indique une période très humide à partir de 2002 (avec maximum absolu en 2003). Deux périodes sèches sont observées, la première qui est courte et moins accentuée 1942-1947, et la deuxième plus importante de 1971 à 2001, interceptée par quelques années humides, mais qui ne semble pas perturber le régime pluviométrique de cette région

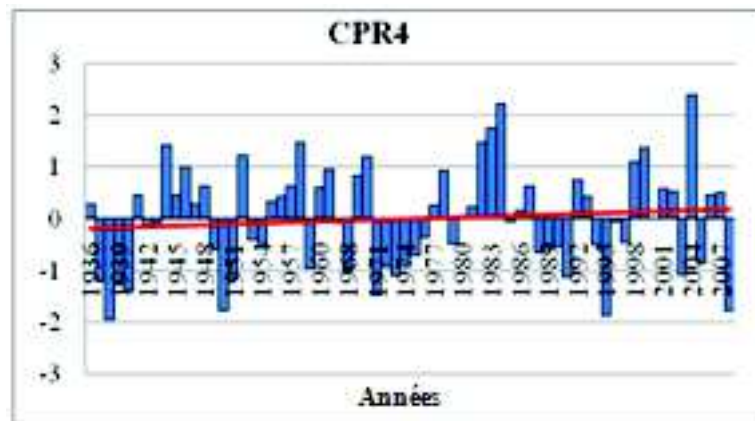


Figure 53 : Chronique temporelle de la quatrième composante après rotation varimax.

La quatrième composante caractérise toute la région des hauts plateaux centre et Ouest. Cette région est corrélée négativement avec cette composante, de ce fait la tendance réelle devrait être à l'inverse de la tendance observée sur le graphe (figure 53) c'est-à-dire une tendance à la baisse. Nous relevons une alternance de périodes sèches et humides avec différents degrés de sévérité d'une période à l'autre.

La période 1937-1940 est très excédentaire pour toute la région, aussi la période 1971-1974. Les années 1995 et 2008 ont été très excédentaires sur l'ensemble de la région. Les hauts plateaux ouest ont connu des périodes déficitaires pendant la moitié des années 1940 et la moitié des années 1950 mais la plus sévère est celle qu'a connue la région durant la décennie 1980.

Conclusion

L'analyse en composantes principales a mis en évidence à l'échelle spatiale une régionalisation du régime pluviométrique du Nord Algérien, selon cinq régions : le centre littoral, l'Est littoral, l'Ouest littoral, les hauts plateaux Est et les hauts plateaux centre et ouest. Cette régionalisation englobe les stations qui manifestent le même comportement hydrologique (variation pluviométrique) durant la période 1936-1937/2008-2009. Les tendances révélées par la chronique temporelle de chaque région coïncident avec les résultats des tests de rupture et l'indice pluviométrique.

9-2- Analyse en composantes principales à l'échelle saisonnière.

À l'échelle de la saison, l'analyse en composantes principales permettra de détecter un changement dans la répartition spatiale par rapport à la régionalisation globale (échelle annuelle) et déterminer ainsi la saison et la région la plus affectée par la sécheresse. Pour cela nous avons opté pour une analyse en composante principale avec rotation varimax.

9-2-1- ACP automne

Les résultats de l'ACPR pour l'automne indiquent que les quatre premières composantes expliquent 62,5% de la variance totale

composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	18,7	18,8	12,5	12,5
% cumulé	18,7	37,5	50,0	62,5

Tableau 16 : Résultats de l'ACPR pour l'automne.

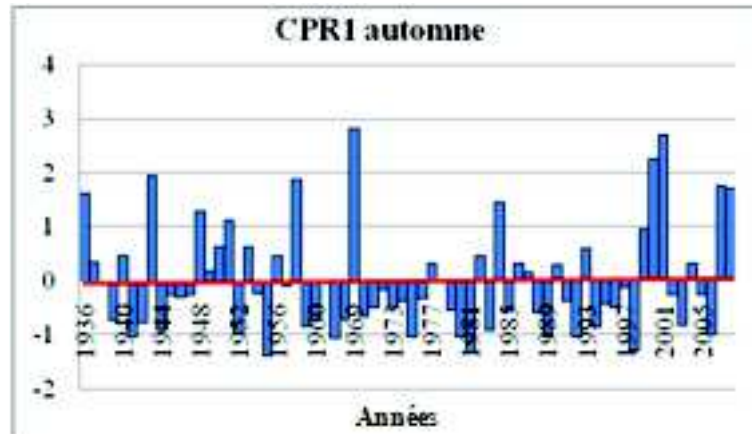


Figure 54 : Chronique temporelle de la première composante de la saison d'automne.

La première composante explique 18,7% de la variance, elle oppose l'Est et l'Ouest de la zone d'étude (figure 55). La chronique temporelle associée à cette composante ne montre aucune tendance. L'automne des trois années 1999, 2000 et 2001 a été très pluvieux à l'ouest du pays, les années humides 1943, 1969, 2007 et 2008 ont aussi marqué l'Ouest et l'Est de la zone d'étude. Nous pouvons distinguer des périodes sèches entre les années 1970 et 1990.

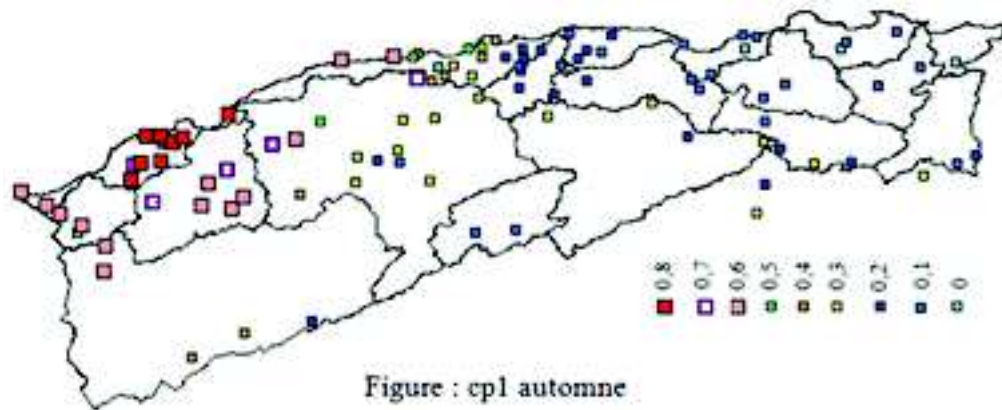


Figure 55 : cpr1 automne.

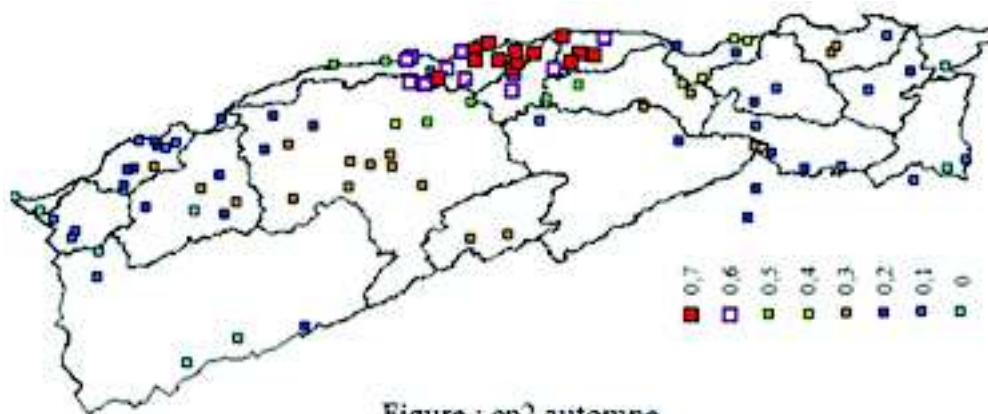


Figure : cp2 automne

Figure 56 : cpr2 automne.

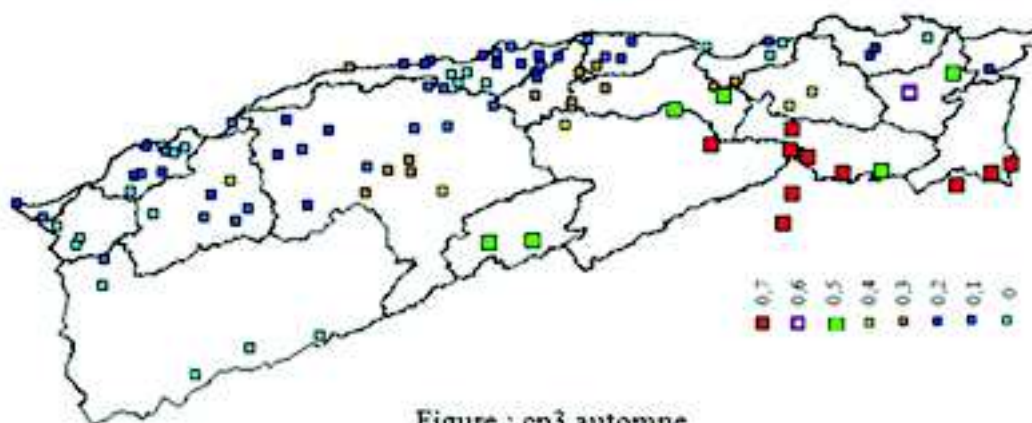


Figure : cp3 automne

Figure 57 : cpr3 automne.

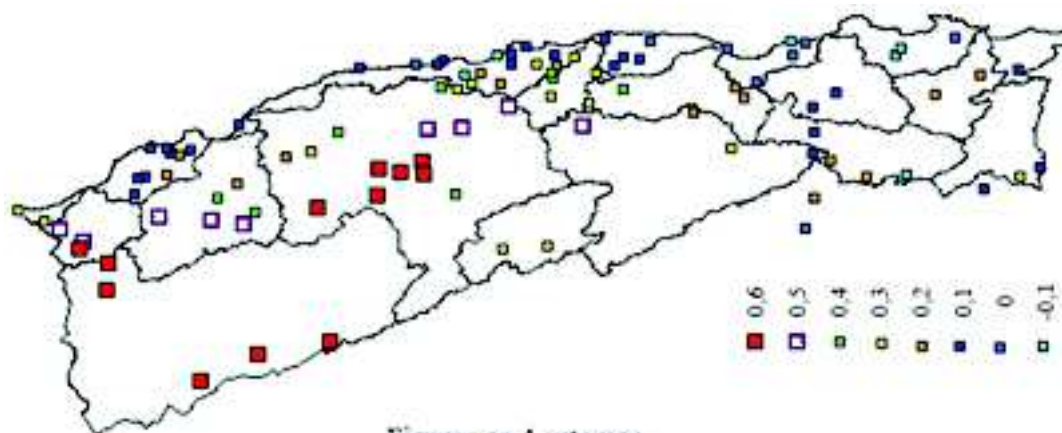


Figure : cp 4 automne

Figure 58 : cpr4 automne.

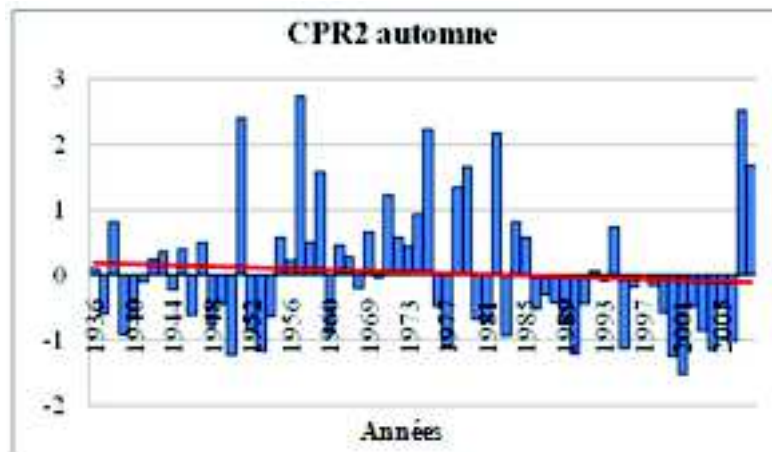


Figure 59 : Chronique temporelle de la deuxième composante de la saison d'automne.

La deuxième composante explique 18,8% de la variance totale, elle caractérise la région centre (côtière) de la zone d'étude (figure 56), les coefficients de corrélation varient entre 0% et 80%. La chronique temporelle met en évidence une légère tendance à la baisse à partir de 1976. Les périodes 1986-1991 et 1998-2006 sont déficitaires en cette saison. Nous constatons que la sécheresse n'a pas touché cette saison durant les années 1970 puisque nous relevons des périodes excédentaires entre 1971-1975. Les années 2007 et 2008 sont aussi excédentaires pour cette région.



Figure 60 : Chronique temporelle de la troisième composante de la saison d'automne.

La troisième composante explique 12,5% de la variance totale, elle caractérise l'extrémité Est de la zone d'étude, la région des hauts plateaux. La chronique temporelle indique des déficits et des excédents moins accentués, elle ne montre aucune tendance puisque cette région ne présente aucune rupture du régime pluviométrique en automne (selon les tests de rupture).

La quatrième composante explique 12,5% de la variance, elle caractérise les hauts plateaux ouest et centre. Cette région a connu des saisons d'automne très excédentaires pendant les décennies 1950, 1990 et 2000. La période 1980-1986 est toujours sèche.

Conclusion

Pour l'automne, l'analyse en composantes principales met en évidence une régionalisation identique à celle de l'ACP globale (annuelle) sauf que les régions expliquées par les deux

premières composantes sont inversées (à l'échelle annuelle, la CP1 caractérise le centre et la P2 oppose l'est et l'ouest). La chronique temporelle des quatre composantes confirme bien les résultats des tests de rupture pour cette saison, puisque elle ne montre aucune tendance à la baisse (l'automne n'a pas montré de rupture excepté pour quelques stations), et met en évidence les excédents de l'automne 2007 et 2008.

9-2-3- ACP hiver

Les résultats de l'ACPR pour l'hiver indiquent que les quatre premières composantes expliquent 55% de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	18,3	17,3	8,8	10,6
% cumulé	18,3	35,6	44,4	55,0

Tableau 17 : Résultats de l'ACPR hiver.

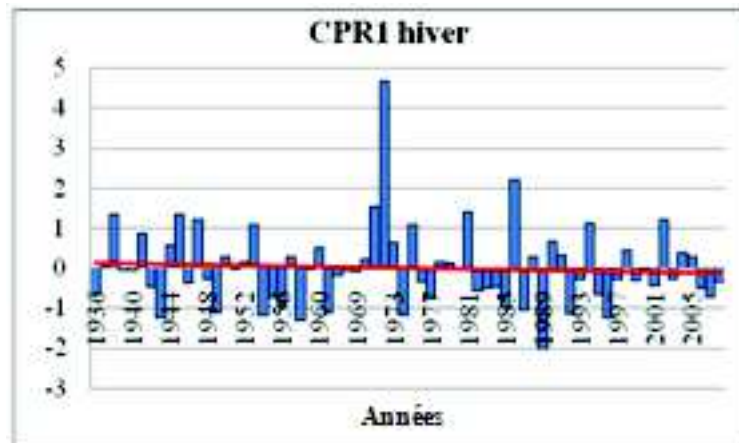


Figure 62 : Chronique temporelle de la première composante de la saison d'hiver.

La première composante explique 18,3% de la variance totale, le coefficient de corrélation varie entre 0% et 90%. La région centre est la plus corrélée avec cette composante. La chronique temporelle met en évidence une alternance de périodes sèches et humides. L'hiver 1972 a été très pluvieux sur tout le centre de la zone d'étude.

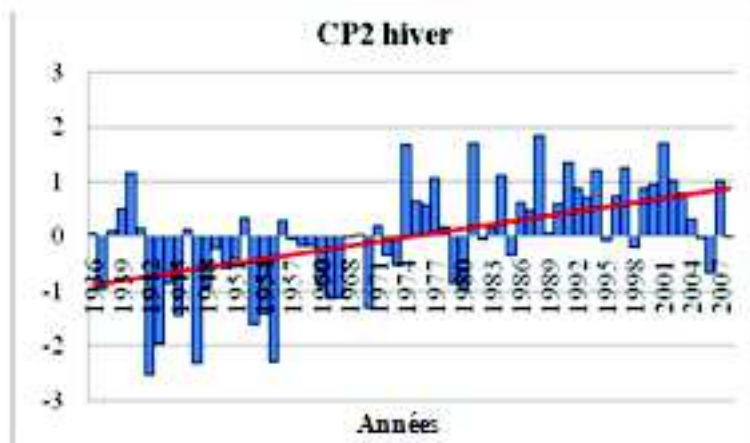


Figure 63 : Chronique temporelle de la deuxième composante de la saison d'hiver.

La deuxième composante explique 17,3% de la variance, elle oppose les régions Est et Ouest littoral corrélées négativement avec cette composante de ce fait, la chronique temporelle met en évidence une tendance à l'augmentation au lieu d'une tendance à la baisse. Les années (périodes) situées entre 1942 et 1956 (1942-1945, 1947-1951, 1953-1955) sont caractérisées en réalité par des hivers très excédentaires surtout à l'ouest. L'hiver des années 1960, 1967 et 1968 est excédentaire à l'est et à l'ouest. La période 1974-1977 a été déficitaire pour les deux régions surtout à l'ouest. Les deux périodes 1986-1994 et 1999-2001 ont connu des hivers déficitaires plus accentués à l'ouest.

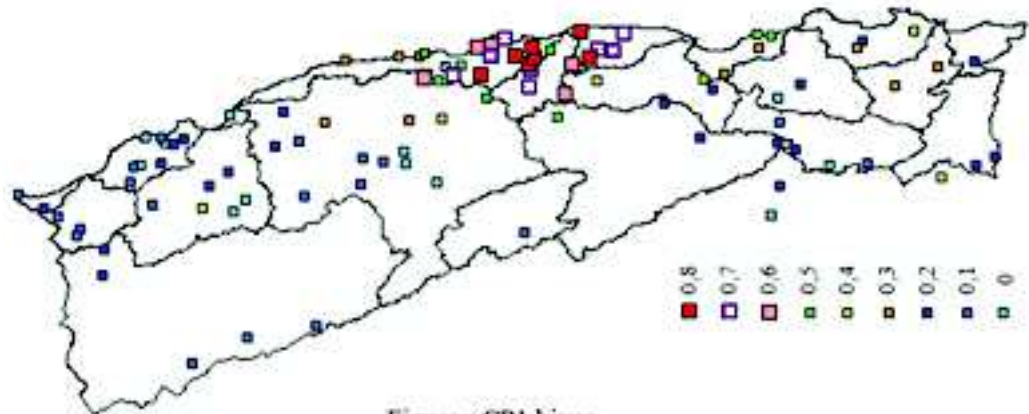


Figure : CP1 hiver

Figure 64 : cpr1 hiver.

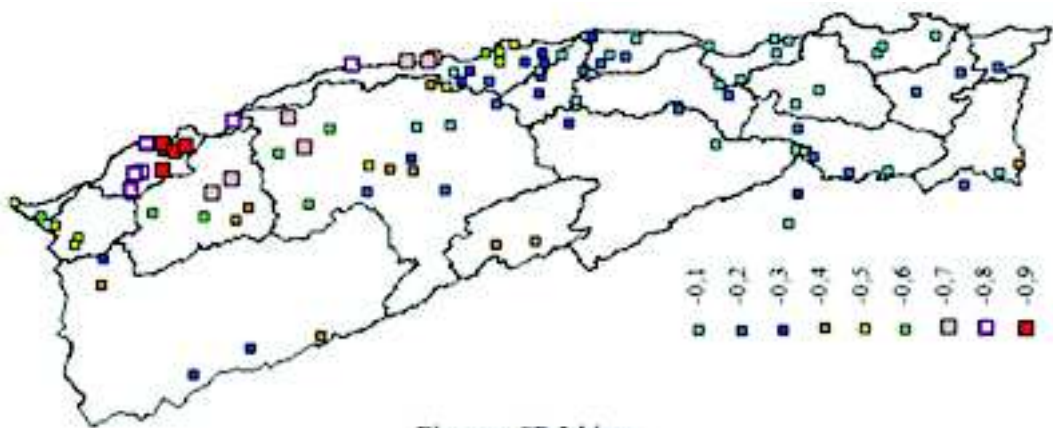


Figure : CP 2 hiver

Figure 65 : cpr2 hiver.

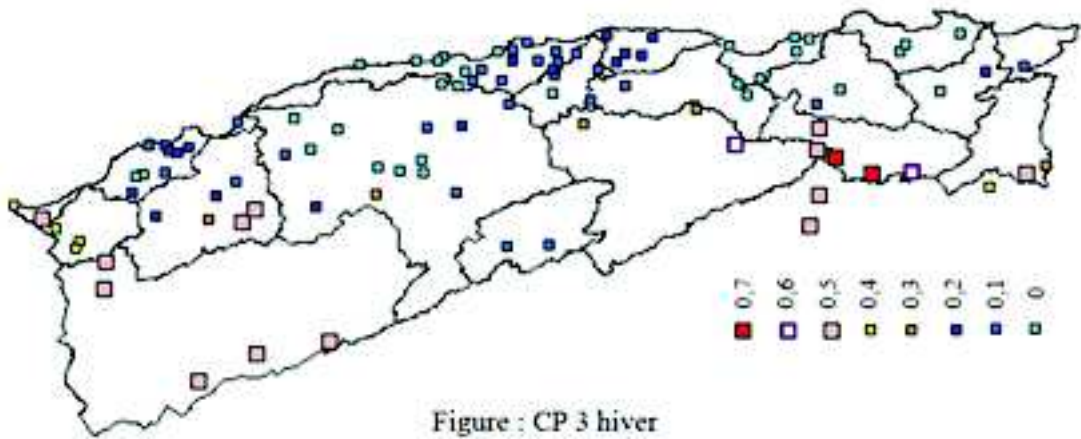


Figure : CP 3 hiver
 Figure 66 : cpr3 hiver.

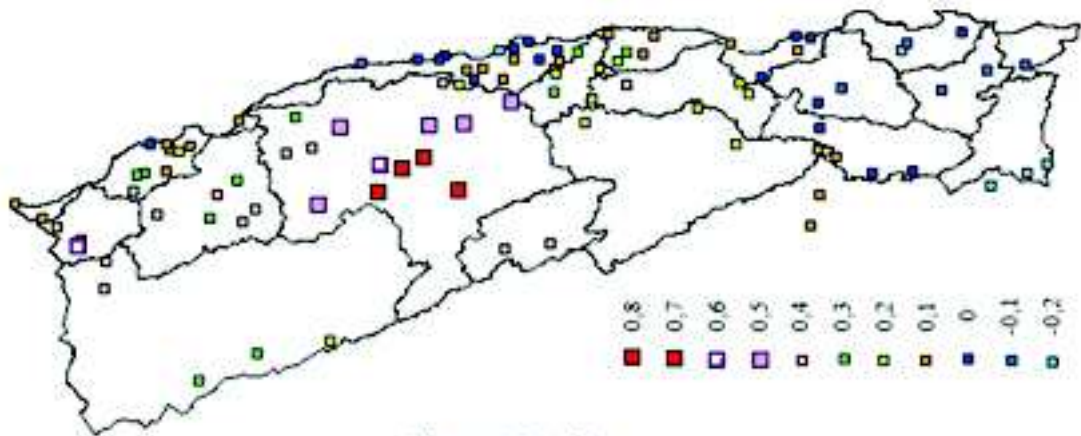


Figure : CP 4 hiver
 Figure 67 : cpr4 hiver.

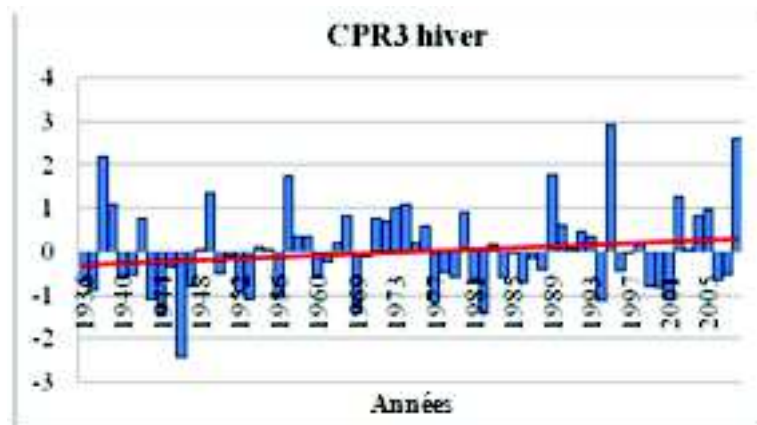


Figure 68 : Chronique temporelle de la troisième composante de la saison d'hiver.

La troisième composante explique 8,8% de la variance, elle caractérise le sud-est et le sud-ouest du Nord Algérien (les hauts plateaux). La chronique temporelle met en évidence une alternance de périodes sèches et humides. Les stations corrélées avec cette composante ne présentent pas de rupture du régime pluviométrique en hiver (selon les tests). La période excédentaire 1971-1974 a surtout marqué le sud-ouest, et la période

déficitaire 1999-2001 a touché le sud-est et le sud-ouest. L'hiver de 1995 et 2008 a été très pluvieux au sud-est et au sud-ouest de la zone d'étude.

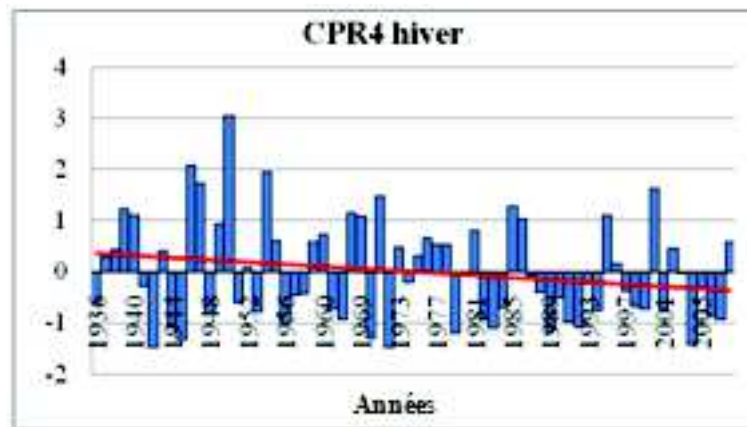


Figure 69 : Chronique temporelle de la quatrième composante de la saison d'hiver.

La quatrième composante explique 10,6% de la variance, elle caractérise les hauts plateaux centre (le Cheliff). La chronique temporelle montre une tendance à la baisse. À partir de 1980 des hivers secs apparaissent, interceptés par quelques hivers excédentaires.

Conclusion

La régionalisation de la zone d'étude expliquée par les quatre premières composantes pour l'hiver diffère légèrement de l'ACPR globale (annuelle) pour montrer les régions les plus touchées par la sécheresse. À l'échelle temporelle, le déficit pluviométrique en hiver a été plus important à l'ouest de la zone d'étude surtout pendant les trois dernières décennies.

9-2-3- ACP printemps

Les résultats de l'ACPR pour le printemps indiquent que les quatre premières composantes expliquent 66,9 % de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	22,9	23,6	11,0	9,4
% cumulé	22,9	46,5	57,5	66,9

Tableau 18 : Résultats de l'ACPR printemps.

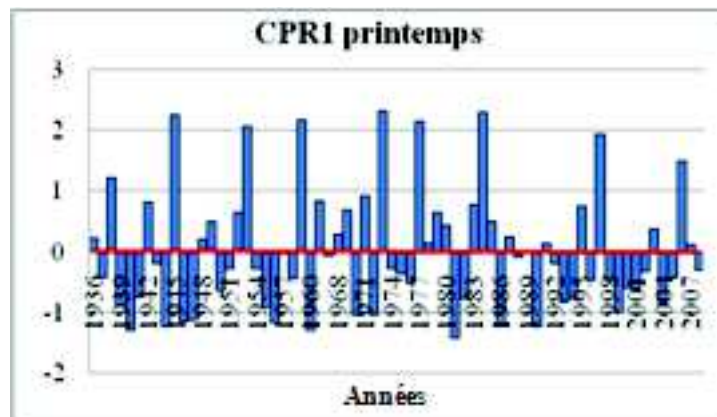


Figure 70 : Chronique temporelle de la première composante de la saison du printemps.

La première composante explique 22,9% de la variance totale, elle caractérise la région centre de la zone d'étude. La chronique temporelle associée à cette composante ne montre aucune tendance. Effectivement, au printemps la région centre ne présente pas de rupture du régime pluviométrique (selon les tests). Pour cette région, Il apparait des excédents importants et des déficits moins accentués en cette saison.

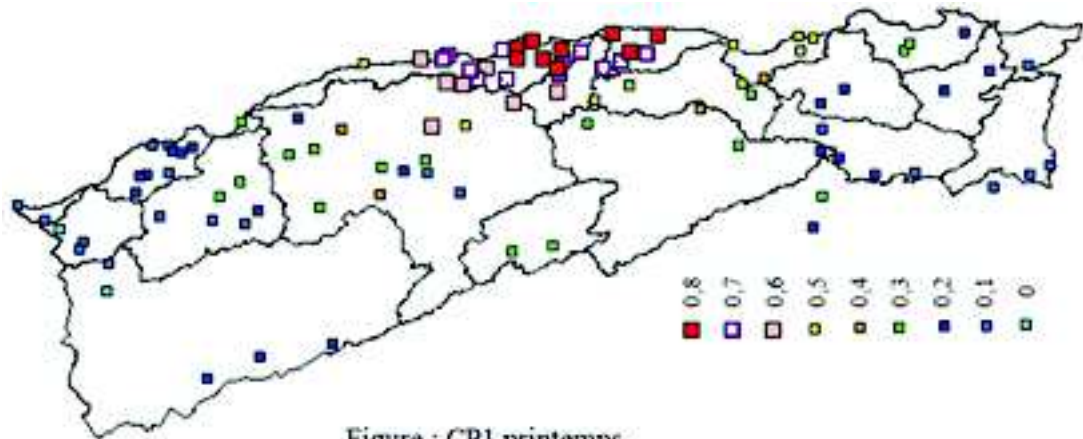


Figure : CP1 printemps

Figure 71 : cpr1 printemps.

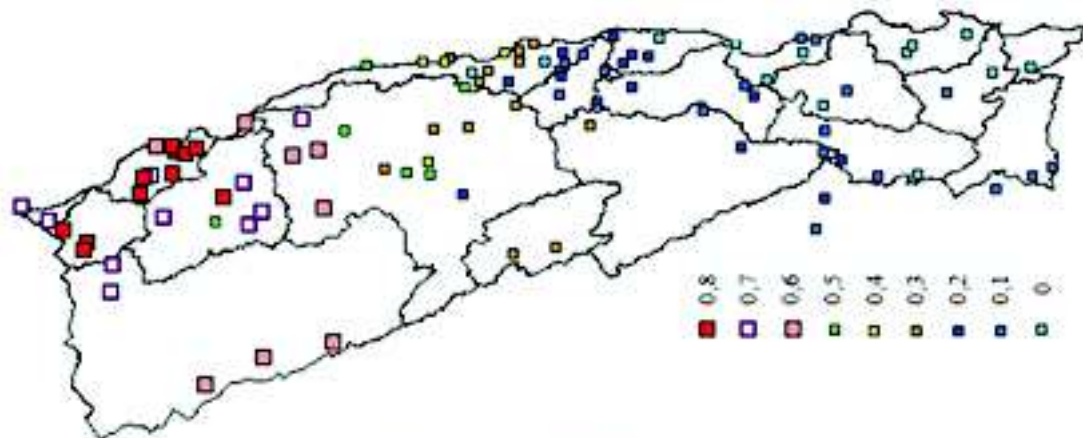


Figure : CP 2 printemps

Figure 72 : cpr2 printemps.

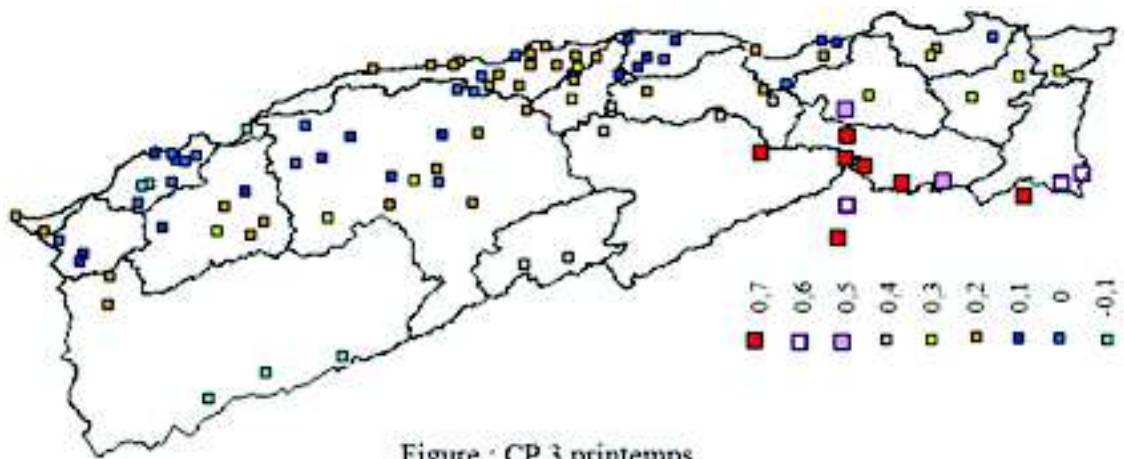


Figure : CP 3 printemps

Figure 73 : cpr3 printemps.

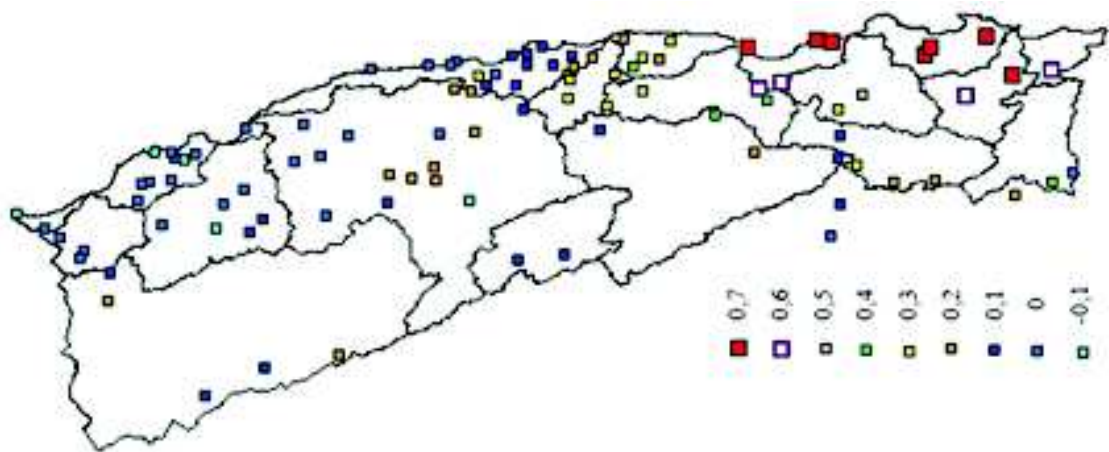


Figure 74 : cpr4 printemps.

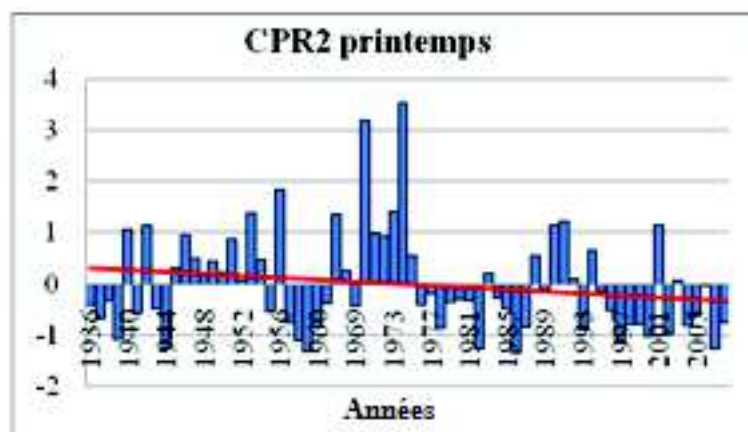


Figure 75 : Chronique temporelle de la deuxième composante de la saison de printemps.

La deuxième composante explique 23,6% de la variance totale, elle caractérise toute la partie Ouest de la zone d'étude. Il apparaît que, cette région est la seule à présenter une rupture du régime pluviométrique au printemps. Une période sèche est distinguée de 1957 à 1961, d'autres périodes sèches assez importantes (en termes de durée) apparaissent aussi

à partir de 1976(1976-1983, 1995-2000). Alors que les périodes 1945-1954 et 1970-1975 sont excédentaires pendant cette saison.

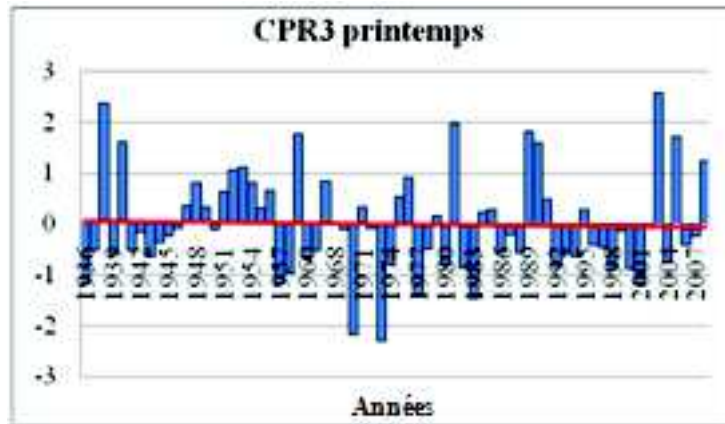


Figure 76 : Chronique temporelle de la troisième composante de la saison de printemps.

La troisième composante explique 11% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux Est de la zone d'étude. La chronique temporelle met en évidence l'alternance d'années sèches et humides. Les années hydrologiques 1970-1971 et 1973-1974, sont les plus déficitaires en cette saison, et les années 1938-1939, 1981-1982, 2003-2004 sont les plus excédentaires.

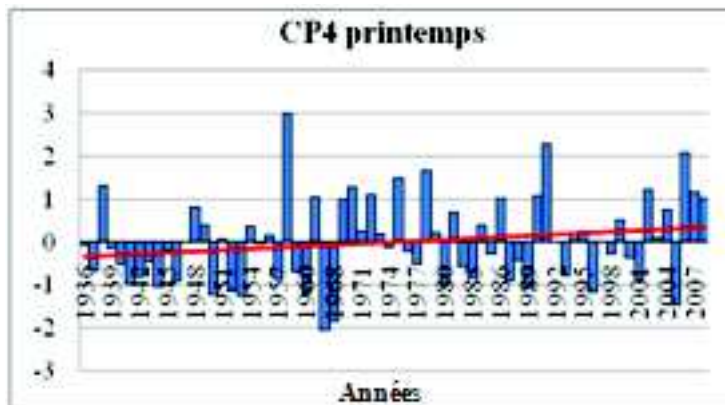


Figure 77 : Chronique temporelle de la quatrième composante de la saison de printemps.

La quatrième composante explique 9,4% de la variance totale, tout le côtier Constantinois (littoral est) se trouve corrélé à cette composante. Le coefficient de corrélation varie entre -10% et 80%. La chronique temporelle montre une tendance à l'augmentation due aux différentes années et périodes excédentaires qui apparaissent à partir de 1969 (1969-1973, 2006-2008). Une période sèche apparaît entre 1939 et 1947.

Conclusion

Les régions définies par l'ACPR pour le printemps ne sont pas tout à fait identiques à celles données par l'ACPR globale, par contre elles coïncident exactement avec les résultats des tests de rupture. Seule la partie Nord-ouest connaît une baisse des précipitations au printemps. Le centre et les hauts plateaux Est n'ont pas connu de changement et sont expliqués donc par les mêmes composantes qu'à l'échelle annuelle. Le littoral Est

ayant connu des excédents importants au printemps, se trouve expliqué par la quatrième composante.

9-3- Analyse en composantes principales des trois périodes

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des trois périodes 1936-1975, 1976-2001, 2002-2008 nous permet de déterminer si vraiment un changement spatial a eu lieu d'une période à l'autre à cause d'une rupture pluviométrique ainsi que les régions les plus touchées par cette rupture. Dans ce cas, la chronique temporelle ne sera pas d'un grand intérêt, elle peut servir à déterminer les années les plus excédentaires pendant la période excédentaire et les années les plus déficitaires pendant la période déficitaire, ce qui a déjà été fait.

Nous appliquerons l'analyse en composantes principales avec rotation varimax.

9-3-1- Période I

Pour la période excédentaire (1936-1975) les quatre premières composantes expliquent 60,7% de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	16,4	13,7	11,8	18,7
% cumulé	16,4	30,1	42,0	60,7

Tableau 19 : Résultats de l'ACPR période I.

La première composante explique 16,4% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux du Nord-est Algérien (partie orientale). La deuxième composante explique 13,7% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux du Nord-Ouest Algérien (partie occidentale). La troisième composante explique 11,8% de la variance totale, elle oppose le côtier Est et le côtier Ouest. La quatrième composante explique 18,7% de la variance totale, elle caractérise le centre (côtier Algérois) de la zone d'étude.

Pour la période 1936-1975, nous retrouvons les mêmes régions que celles de la période d'étude 1936-2008 (ACPR globale), sauf que dans ce cas les régions expliquées par les quatre premières composantes sont inversées par rapport à celle de l'ACPR globale où ; la CPR1 caractérise le centre, la CPR2 oppose l'Est et l'Ouest côtier, la CPR3 caractérise les hauts plateaux Ouest et la CPR4 caractérise les hauts plateaux Est.

9-3-2- Période II

Les résultats de l'ACPR pour la deuxième période 1976-2001 indiquent que les quatre premières composantes expliquent 63,1% de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	27,2	13,7	10,3	11,9
% cumulé	27,2	40,9	51,3	63,1

Tableau 20 : Résultats de l'ACPR période II.

La première composante explique 27,2% de la variance totale, elle caractérise le centre et l'est côtier de la zone d'étude. Ces deux régions ont connu la même variation du régime pluviométrique durant cette période (les mêmes années déficitaires et excédentaires) mais avec des degrés différents. La deuxième composante explique 13,7% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux Est. La troisième composante explique 10,3% de la variance totale, elle caractérise le côtier Ouest. La quatrième composante explique 11,9% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux Ouest et centre.

L'analyse en composantes principales met en évidence pour la période 1976-2001, les mêmes régions que la période de référence et la première période sauf qu'elles ne sont pas expliquées par les mêmes composantes. Le centre et l'est sont expliquées par une seule composante se qui signifie qu'elles ont eu le même comportement pluviométrique durant la période déficitaire 1976-2001, mais avec des degrés de sécheresse moins accentués à l'Est. La région ouest a connu les déficits les plus importants sur toute la zone d'étude et se trouve donc définie par une seule composante.

9-3-3- Période III

Les résultats de l'ACPR pour la troisième période 2002-2008 indiquent que les quatre premières composantes expliquent 85,9% de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4
% variance	33,4	12,5	26,3	13,6
% cumulé	33,4	45,9	72,3	85,9

Tableau 21 : Résultats de l'ACPR période III.

La première composante explique 33,4% de la variance totale, elle caractérise tout l'Ouest Algérien. Cette région a connu un retour vers la normale pendant cette période et a surtout été marquée par la forte pluviométrie de 2008. La deuxième composante explique 12,5% de la variance totale, elle caractérise les hauts plateaux Est. La troisième composante explique 26,3% de la variance totale, elle caractérise la région centre de la zone d'étude. La quatrième composante explique 13,6% de la variance totale, elle caractérise le côtier Est de la zone d'étude. Cette région a connu une augmentation considérable de la pluviométrie durant la période 2002-2008.

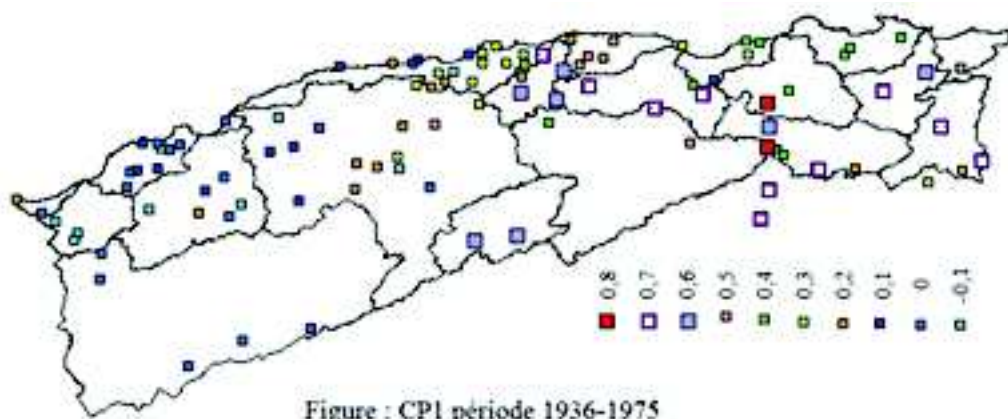


Figure : C1 période 1936-1975

Figure 78 : cpr1 période 1936-1975.



Figure : CP2 période 1936-1975

Figure 79 : cpr2 période 1936-1975.



Figure : CP3 période 1936-1975

Figure 80 : cpr3 période 1936-1975.



Figure : CP 4 période 1936-1975

Figure 81 : cpr4 période 1936-1975.

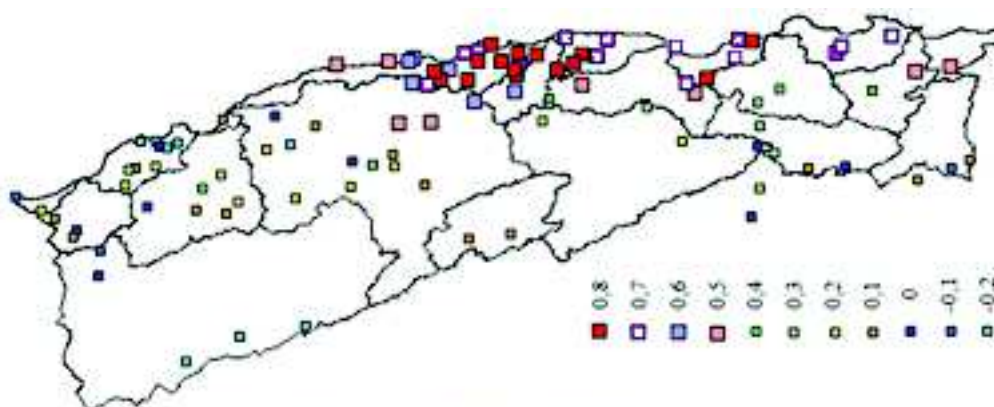


Figure : CP 1 période 1976-2001

Figure 82 : cpr1 période 1975-2001.



Figure : CP 2 période 1976-2001

Figure 83 : cpr2 période 1975-2001.

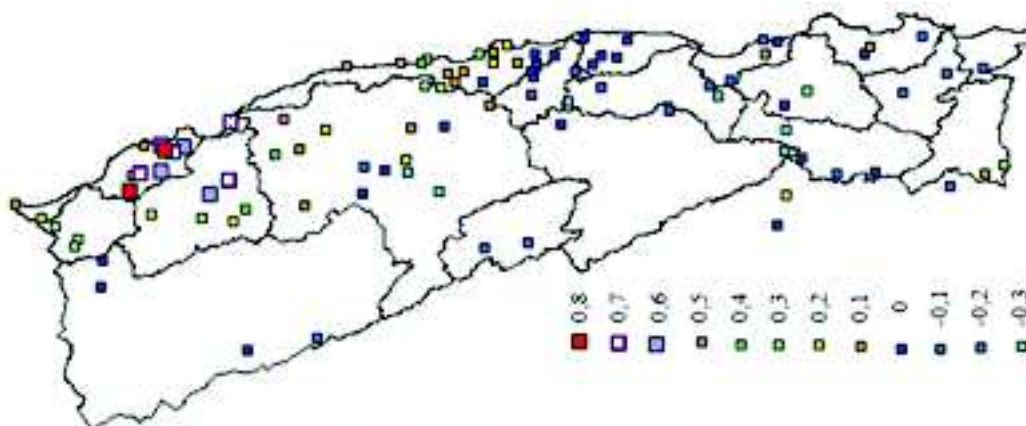


Figure : CP 3 période 1976-2001

Figure 84 : cpr3 période 1975-2001.

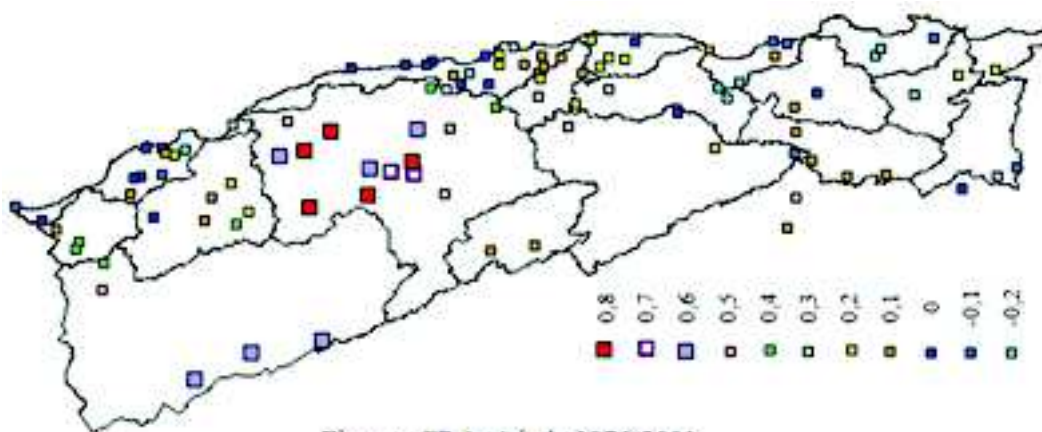


Figure : CP 4 période 1976-2001

Figure 85 : cpr4 période 1975-2001.

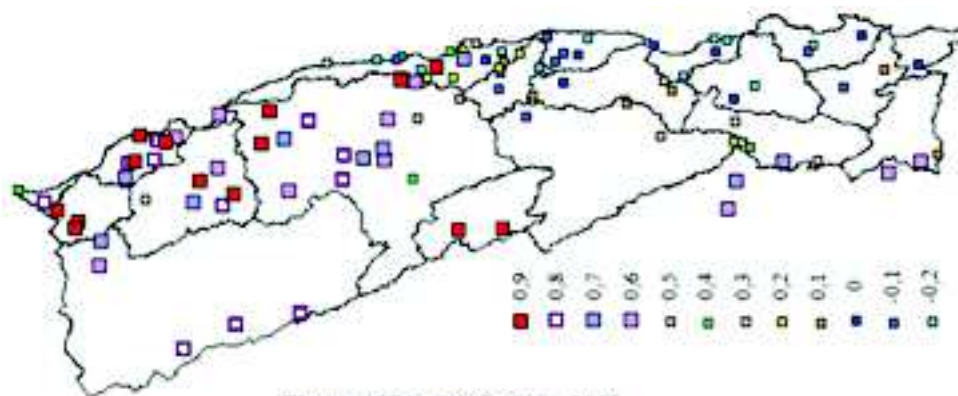


Figure : CP1 période 2001-2008

Figure 86 : cpr1 période 2002-2008.



Figure : CP 2 période 2002-2008

Figure 87 : cpr2 période 2002-2008.



Figure : CP 3 période 2002-2008

Figure 88 : *cpr3* période 2002-2008.

Figure : CP4 période 2002-2008

Figure 89: *cpr4* période 2002-2008.

Conclusion

Nous finalisons l'étude du régime pluviométrique par ce chapitre, à travers une analyse en composantes principales dans le but de déterminer la variabilité spatio-temporelle à différentes échelles de temps (annuelle, saisonnière, et par périodes). Cette analyse n'a fait que confirmer les résultats obtenus précédemment par les tests de rupture et l'indice pluviométrique, en outre : une rupture du régime pluviométrique interannuelle à partir de la moitié des années 1970 qui est plus importante à l'Ouest de la zone d'étude, et la saison hivernale qui influence le régime interannuel. Une régionalisation a été mise en évidence par l'analyse en composantes principales, que ce soit au pas de temps annuel ou saisonnier, les régions identifiées par l'ACP sont :

- La région centre littorale : caractérisée par une légère baisse des précipitations annuelles à partir de la moitié des années 70. Cette baisse apparaît pendant les saisons d'automne et d'hiver. Cette région est en période normale depuis 2002.
- La région Est littorale : caractérisée par une stabilité du régime pluviométrique annuelle et une augmentation des précipitations en hiver et au printemps à partir de 2002.

- La région Ouest littorale : caractérisée par un déficit pluviométrique annuel important à partir de 1976. Cette région a connu une baisse des précipitations en hiver et au printemps. Cette région connaît un retour vers la normale depuis 2002, elle est surtout marquée par les fortes pluies de 2008.
- La région des hauts plateaux Est : caractérisée par une stabilité du régime pluviométrique et une augmentation des précipitations en hiver.
- La région des hauts plateaux Ouest et centre : caractérisée par les déficits pluviométriques les plus importants de la zone d'étude surtout en hiver et au printemps. Cette région connaît elle aussi un retour vers la normale depuis 2002 et enregistre une forte pluviométrie en 2008.

chapitre 10 : Analyse des températures

Introduction

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

Pour ce faire une analyse de la tendance sera effectuée par le biais des méthodes graphiques, des tests de rupture, et l'analyse en composantes principales. Une analyse de la périodicité sera déterminée par une analyse spectrale.

10-1- Analyse statistique des températures annuelles

L'évolution annuelle des températures (figure 90) montre que les stations côtières (Alger, Oran, Annaba) présentent pratiquement les mêmes variations de l'ordre de 17°C (tableau 22). Les températures annuelles enregistrées à Constantine sont d'environ 15°C. Tandis que la station de Chleff affiche une température moyenne annuelle d'environ 19°.

Tableau 22 : Paramètres statistiques des températures

Paramètres statistiques	Chleff	Oran	Alger	Annaba	Constantine
Moyenne	19,1	17,7	17,6	17,7	15,4
Min	17,9	16,4	16,7	16,5	14,0
Max	20,3	18,9	19,0	18,9	16,8
Écart-type	0,62	0,60	0,58	0,55	0,68
Coefficient de variation	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04

Les températures minimales interannuelles, sont d'environ 16,5°C pour les stations côtières, elles sont moins importantes à Constantine, environ 14°C (à cause des hivers froids de la région) et plus importante à Chleff environ 18°C. Ces températures sont marquées au début des années 70, à l'exception d'Oran (figure 91).

Les températures maximales interannuelles sont d'environ 19°C pour les stations côtières, 17°C à Constantine et 20°C à Chleff. Ces températures sont observées en 1989 pour Alger et Chleff et en 2002 pour Oran, Annaba et Constantine (figure 91).

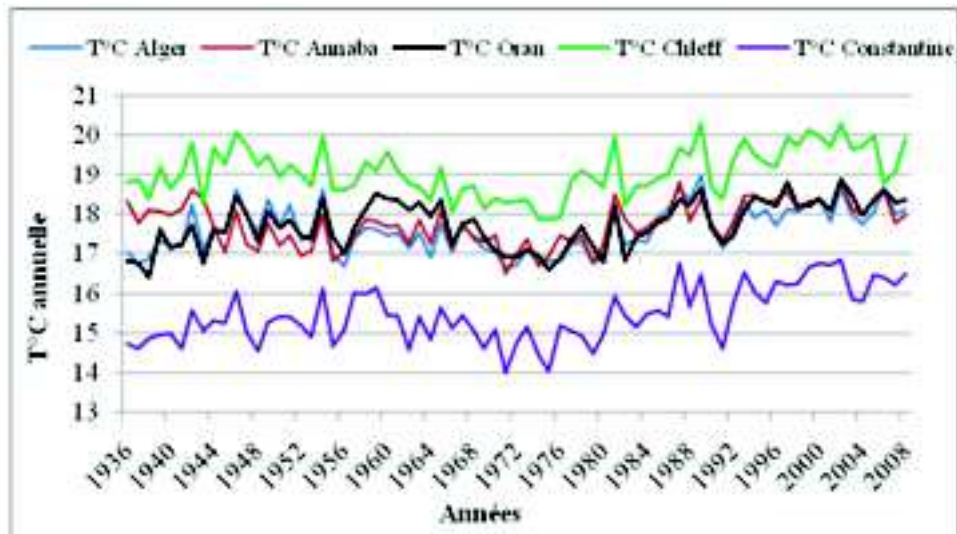


Figure 90 : Évolution des températures annuelles (1936-2008).

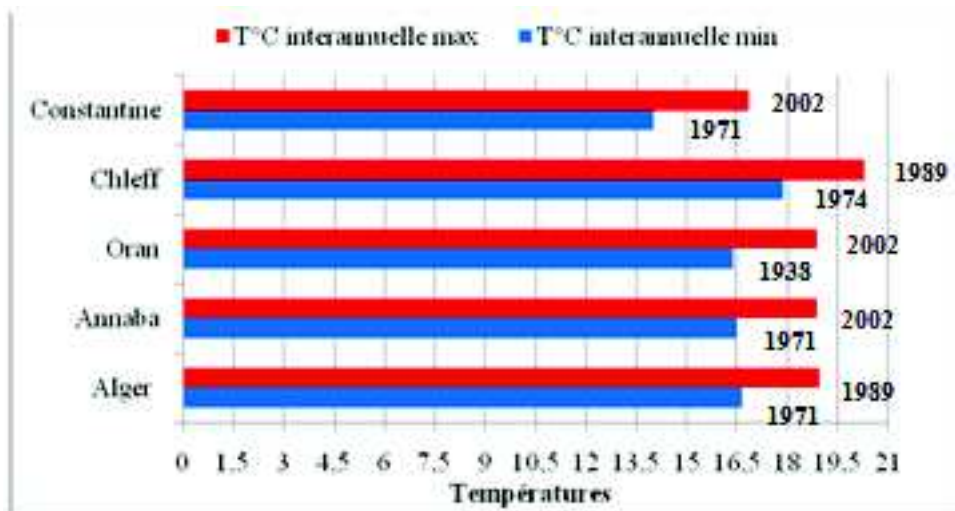


Figure 91 : Températures maximales et minimales interannuelles.

- a- Analyse de la tendance des températures par régression linéaire

Dans l'ensemble, l'analyse graphique de l'évolution annuelle des températures (figure 92) met en évidence trois phases par rapport à la moyenne interannuelle :

- La première phase : entre 1936 et début des années 60, apparait comme une période de réchauffement à Alger, Oran et Chleff. À Annaba et Constantine les températures sont plutôt en dessous de la moyenne ;
- La deuxième phase : entre la moitié des années 60 et début des années 80, s'annonce comme une période de refroidissement pour toutes les stations ;
- La troisième phase : entre la moitié des années 80 et 2008, est une période de réchauffement, où les températures atteignent leur maximum.

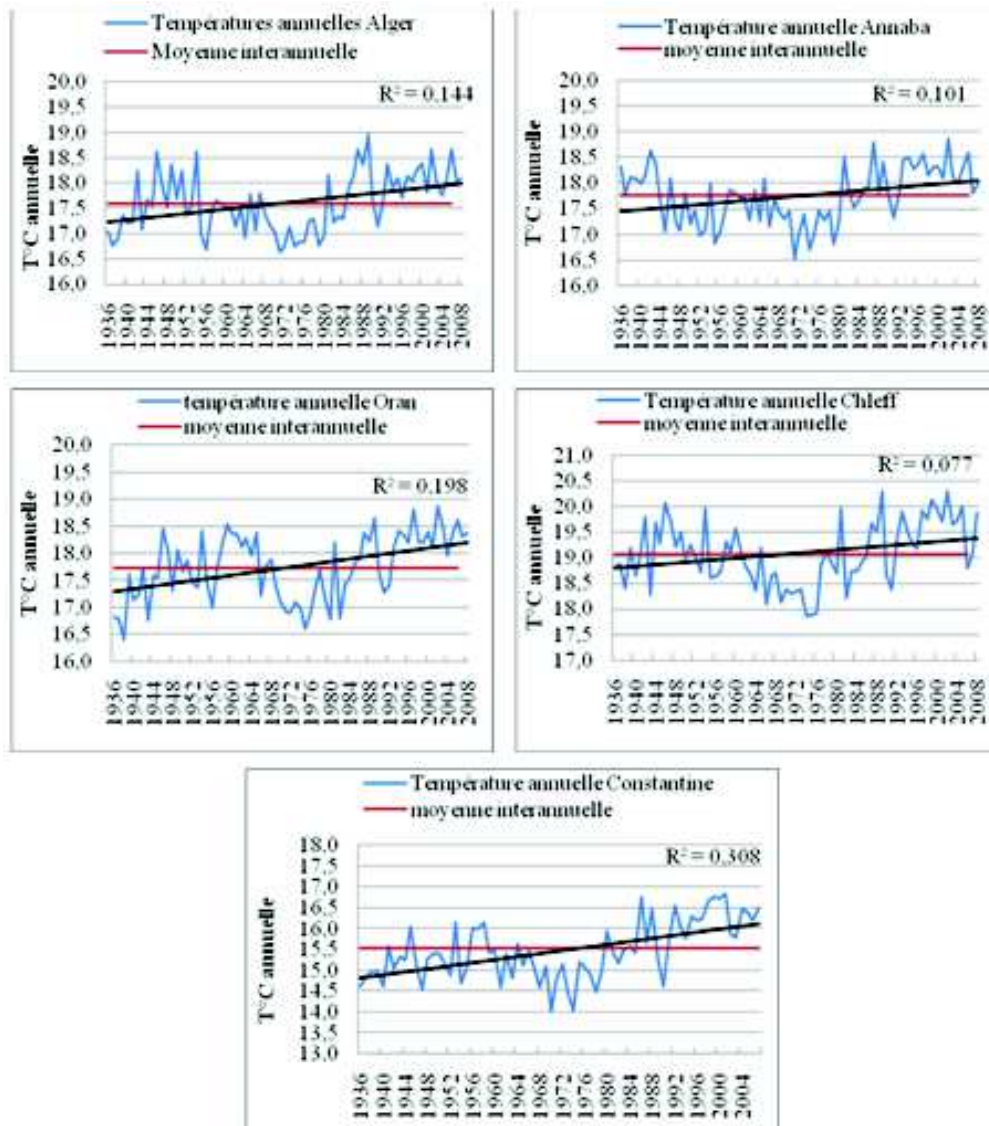


Figure 92 : Tendence des températures annuelles par régression linéaire.

La tendance des températures par régression linéaire est à l'augmentation à partir de la moitié des années 70 (figure 92) pour toutes les stations. Cette augmentation est marquée à Constantine ($R^2 = 0,30$), et Oran ($R^2 = 0,19$), elle est moins importante à Annaba ($R^2 = 0,10$), et Alger ($R^2 = 0,14$), et faible à Chleff ($R^2 = 0,07$).

b- Analyse de la tendance par la moyenne mobile

La moyenne mobile permet de lisser une série de données chronologiques, elle permet d'éliminer les fluctuations les moins significatives.

Nous avons déterminé la moyenne mobile des séries de température pour une période de 10ans.

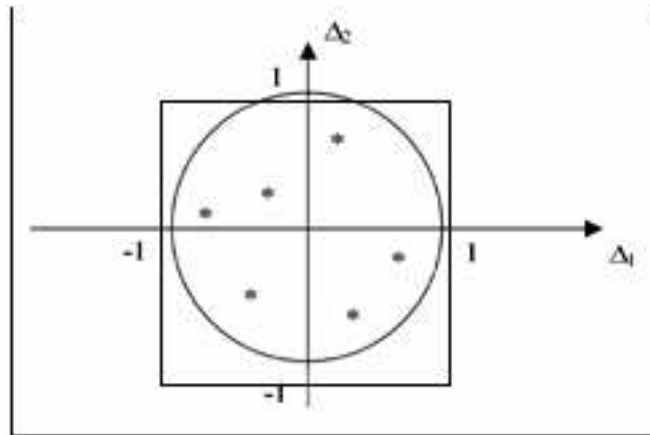


Figure 93 : Moyenne mobile des températures d'Alger.

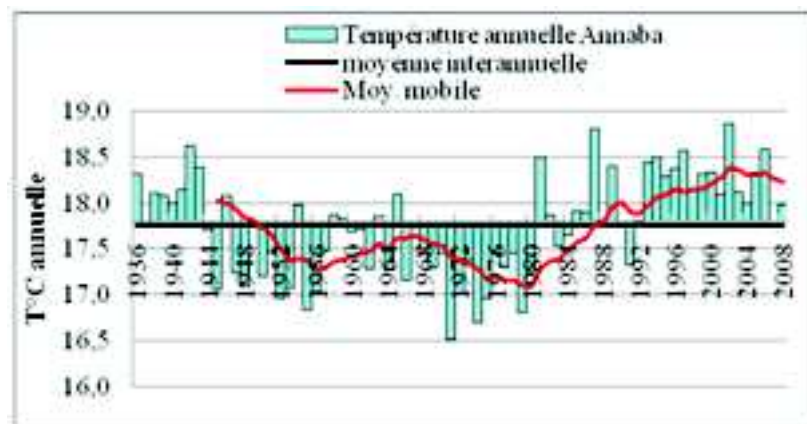


Figure 94 : Moyenne mobile des températures d'Annaba.

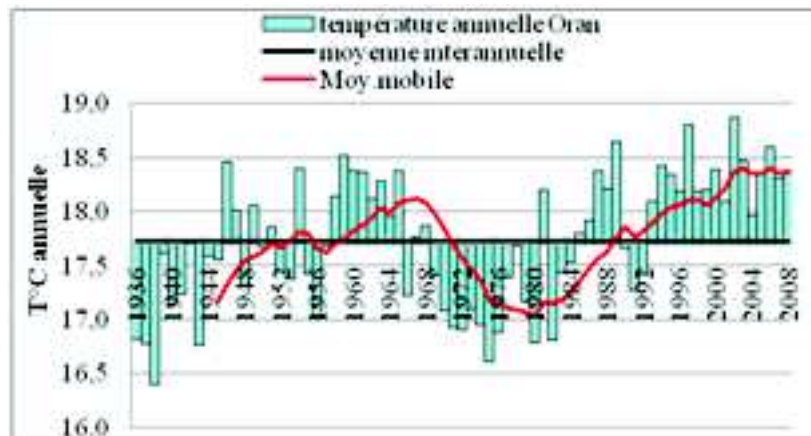


Figure 95 : Moyenne mobile des températures d'Oran.

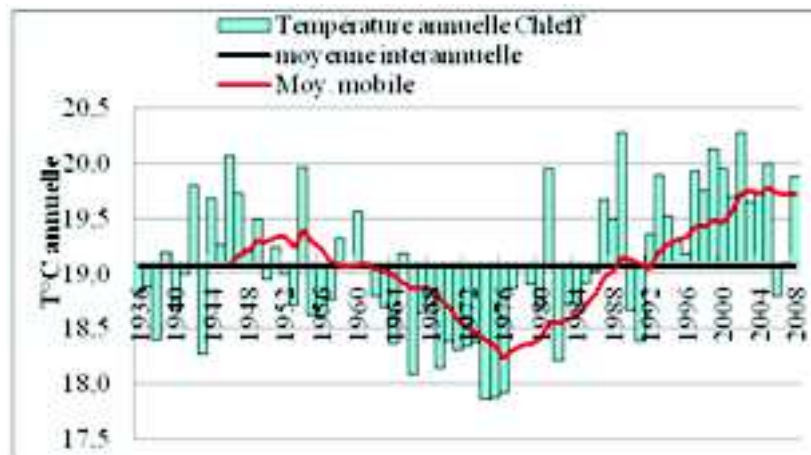


Figure 96 : Moyenne mobile des températures de Chleff.

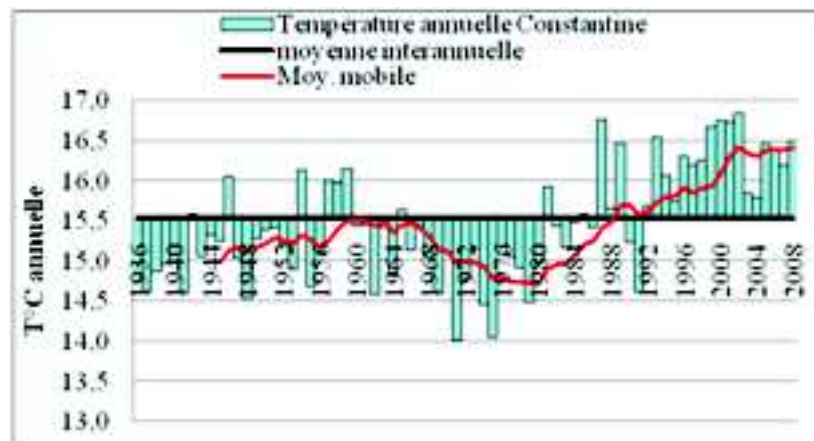


Figure 97 : Moyenne mobile des températures de Constantine.

À Alger, la moyenne mobile sur une période de 10 ans fait apparaître une période de réchauffement d'environ $0,3^{\circ}\text{C}$ pendant la décennie 1946-1956. Une phase descendante commence à partir de 1957 jusqu'à 1976, la décennie la plus froide est 1966-1976, avec un refroidissement d'environ $-0,7^{\circ}\text{C}$.

Une phase ascendante reprend en 1980, elle atteint son maximum en 1994, donc la période 1984-1994 est la plus chaude à Alger, avec un réchauffement d'environ $0,5^{\circ}\text{C}$. Dès 1994, aucune augmentation significative n'est observée, une stabilité de la moyenne des températures s'installe surtout depuis 2002, après une légère baisse entre 1995 et 2001.

À Annaba, les températures sont en baisse depuis 1950. Une phase descendante apparaît dès 1967 et atteint son minimum en 1980. La décennie 1970-1980 est la plus froide, avec un refroidissement d'environ $-0,7^{\circ}\text{C}$. Puis, une phase ascendante prend place, elle s'achève en 2002, la décennie 1992-2002 est marquée par un réchauffement d'environ $0,6^{\circ}\text{C}$. Dès lors, nous relevons une stabilité (voire une légère baisse) des températures.

À Oran, une période de réchauffement est observée entre 1958 et 1968 d'environ $0,4^{\circ}\text{C}$. Ensuite, une phase descendante apparaît, elle atteint son minimum en 1980, donc 1970-1980 est la période la plus froide à Oran ($-0,6^{\circ}\text{C}$). Une phase ascendante est observée à partir de 1980, et s'achève en 2002. La décennie 1992-2002 est marquée par un réchauffement d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$. Depuis, une stabilité des températures est observée.

À Chleff, un réchauffement de 0,3°C marque la décennie 1944-1954. Une phase descendante des températures commence à partir de 1962 pour atteindre un minimum en 1976. La période 1966-1976 est donc la plus froide à Chleff. Un accroissement des températures débute, dès lors, presque identique à celui d'Oran, il atteint son maximum en 2002. La période 1992-2002 est la décennie la plus chaude, le réchauffement est d'environ 0,7°C. Une stabilité des températures est observée à partir de 2002.

À Constantine, jusqu'à 1980, toutes les décennies ont connu une température inférieure à la moyenne. La décennie 1970-1980 est la plus froide, environ -0,8°C. Une phase ascendante apparaît à partir de 1980 jusqu'à 2002. La décennie 1992-2002 connaît un réchauffement d'environ 0,9°C. Nous relevons une stabilité des températures à partir de 2002.

Dans l'ensemble, il ressort de cette analyse que la décennie 1970-1980 est une période de refroidissement commune aux cinq stations. Une augmentation de la température est observée à partir de 1980 d'environ 0,15°C ($\pm 0,05$)/an, la période 1992-2002 étant la décennie la plus chaude, avec un réchauffement d'environ 0,7°C ($\pm 0,2$). Ces résultats concordent parfaitement avec les résultats du GIEC (2007).

Selon le GIEC, l'augmentation importante des températures des dernières années est due principalement à l'activité humaine à cause de l'émission des gaz à effet de serre (CO₂). Tandis que d'autres chercheurs lient cette augmentation aux variations naturelles du climat, entre autre l'oscillation nord atlantique qui a connu une phase positive durant cette période (Salameh T., 2008 ; Szalai S., 2003...etc.)

Entre 2002 et 2008 nous assistons à une stabilisation des températures. D'après le géophysicien Courtillot V. (2009), depuis 1998 la terre connaît une stabilité de la température moyenne, date d'une valeur maximale qui n'a plus été enregistrée. Il apparaît aussi que l'activité solaire est en baisse depuis une dizaine d'années. Donc il se peut qu'il y ait une corrélation. Le professeur Latif M. (2009), de l'institut des sciences marines de l'université de Kiel (Allemagne) aussi membre du GIEC prédit une baisse générale des températures en Europe et en Amérique du Nord durant les deux décennies à venir. Cette baisse serait due à l'oscillation Nord Atlantique qui par sa variation engendre la baisse ou la montée des températures. (www.laterredufutur.com).

10-2- Analyse de la tendance des températures par les tests de rupture

10-2-1- Analyse des températures annuelles

Nous avons utilisé les cinq tests de stationnarité pour détecter une rupture au sein des séries de températures annuelles. Les résultats sont présentés ci-dessous. Le tableau illustre les résultats des tests de Pettitt, Kendall, Buishand, ainsi que la méthode bayésienne de Lee et Heghignian. Les résultats de la Procédure d'Hubert sont donnés sous forme de périodes de rupture significatives. Une moyenne avant et après le point de rupture est calculée aussi par rapport au test de Pettitt ainsi que la différence entre ces deux moyennes.

Tableau 23 : Résultats des tests de rupture des températures annuelles

Stations	Pettitt	Moy. avant	Moy. après	Différence C°	Kendall	Buishand	Lee et Hg	Segmentation Hubert
Alger	1984	17,4	18,1	0,7	rupture	rupture	1984	36-54: 17,6 55-84: 17,2 84-08: 18,1
Annaba	1980	17,5	18,2	0,7	rupture	rupture	1980	36-43 :18,2 44-80 :17,4
Oran	1984	17,5	18,2	0,7	rupture	*	*	36-68 :17,7 69-84 :17,2
Constantine	1986	15,2	16,2	1,0	rupture	rupture	1986	36-80 :15,2 81-95:15,7
Chleff	1986	18,9	19,6	0,7	rupture	rupture	1986	36-61 :19,1 62-86 :18,6

(*) Condition de normalité non satisfaite

D'après les résultats, la procédure de segmentation d'Hubert apparaît comme la méthode la plus intéressante puisqu'elle permet de détecter les différentes fluctuations au sein de la série sur la période de référence 1936/1937-2008/2009. Alors que le test de Pettitt et la méthode bayésienne ne détectent qu'une seule année de rupture se qui n'est pas représentatif du phénomène cyclique des températures.

Selon la segmentation d'Hubert, les stations ne manifestent pas les mêmes variations de température. Par contre, elles indiquent toutes (sauf Constantine) une période de refroidissement entre la moitié des années 50 et la moitié des années 80.

Les stations d'Alger, Oran et Chleff indiquent une diminution des températures à partir de la moitié des années 50, puis une augmentation à partir de la moitié des années 80. La station de Annaba semble indiquer une périodicité et la station de Constantine indique une augmentation des températures à partir de 1980.

Selon le test de Pettitt, toutes les stations enregistrent une augmentation des températures annuelles à partir des années 1980. Cette augmentation est supérieure à 0,5°C, elle atteint 1°C à Constantine.

10-2-2- Analyse des températures minimales et maximales annuelles

L'analyse des températures minimales et maximales annuelles est intéressante pour la détection d'un changement significatif. À Constantine, l'évolution des températures minimales annuelles montre une tendance très importante à l'augmentation à partir des années 1950 (figure 98), et une diminution très importante aussi des températures maximales à partir des années 1950 (figure99).

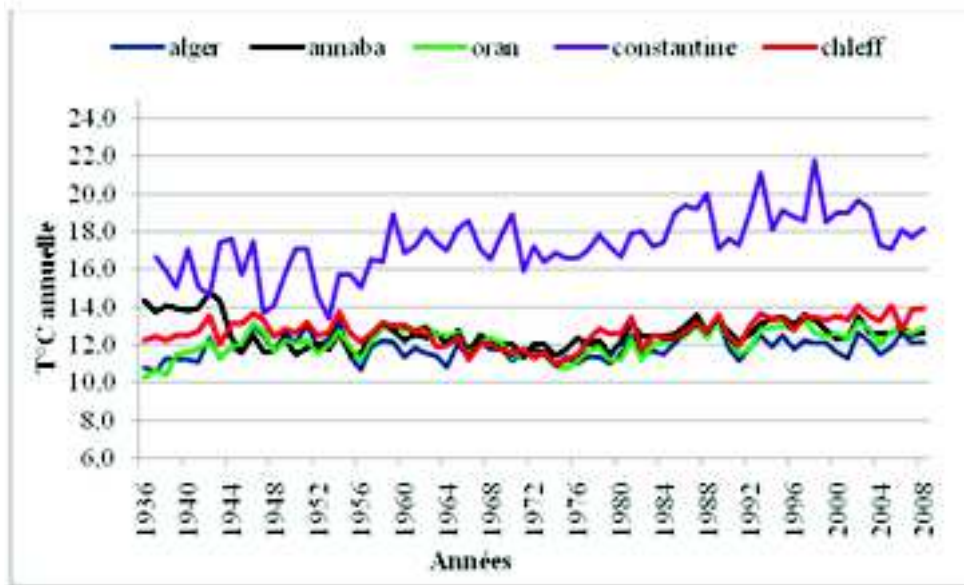


Figure 98 : Évolution des températures minimales annuelles.

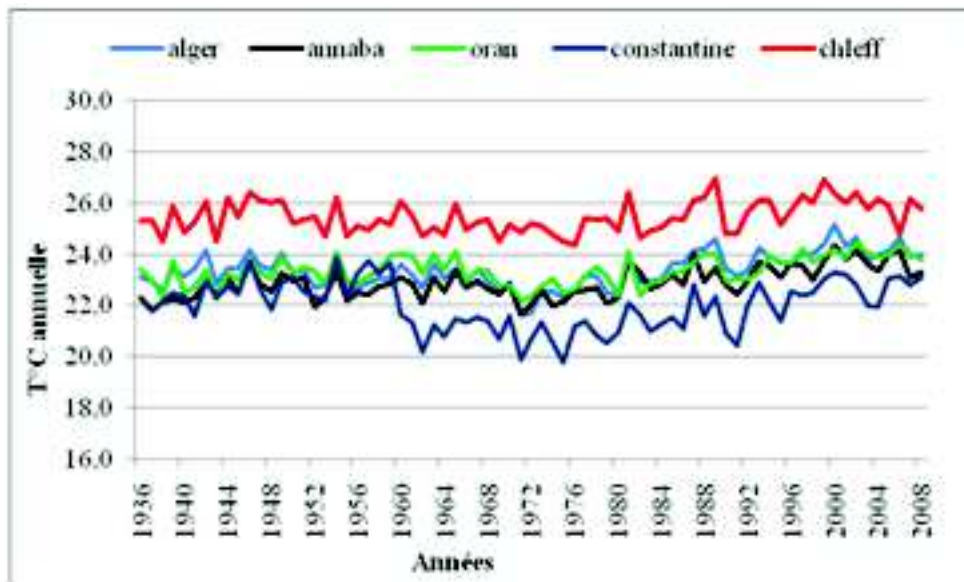


Figure 99 : Évolution des températures maximales annuelles.

Nous avons soumis les températures minimales et maximales annuelles aux tests de Pettitt et la segmentation d'Hubert. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 24 : Résultats des tests de rupture des températures minimales annuelles.

Stations	Pettitt	Moy. avant	Moy. Après	Différence C°	Segmentation Hubert
Alger	1984	11,6	12,2	0,6	36-41 :11,0 42-54 :12,3 55-84 :11,5 85-08 :12,2
Annaba	1980	13,1	12,9	-0,2	36-43 :14,1 44-80 :12,1 81-08 :12,9
Oran	1984	11,9	12,6	0,7	36-38 :10,5 39-57 :12,0 58-65 :12,8 66-08 :12,2
Constantine	1980	16,6	18,6	2,0	36-58 :15,8 59-84 :17,4 85-08 :18,8
Chleff	1986	12,4	13,3	0,9	36-62 :12,8 63-76 :11,7 77-91 :12,6 92-08 :13,3

Tableau 25 : Résultats des tests de rupture des températures maximales annuelles.

Stations	Pettitt	Moy. avant	Moy. après	différence	Segmentation Hubert
Alger	1984	23,1	24,0	0,9	36-68:23,2 69-81:22,5 81-98:23,7 99-00:23,9
Annaba	1980	22,6	23,4	0,8	36-80:22,6 81-98:23,2 99-08:23,9
Oran	1985	23,2	23,8	0,6	36-68:23,3 69-76:22,6 77-96:23,3 97-00:23,9
Constantine	1959	22,7	21,6	-1,1	36-59:22,7 60-91:21,2 92-08:22,5
Chleff	1984	25,0	25,9	0,9	

Selon la segmentation d'Hubert, toutes les températures minimales annuelles indiquent une période de refroidissement (sauf Constantine). La station d'Alger enregistre d'abord un réchauffement de 1,3°C entre 1942 et 1954, suivi d'un refroidissement de -0,8°C à partir de 1955 puis un réchauffement de 0,7°C à partir de 1985.

À Annaba un refroidissement de -2°C est observé à partir de 1944 puis un réchauffement de 0,8°C à partir de 1981. À Oran les températures minimales ont augmenté d'environ 2°C entre 1936 et 1965. Cette période est suivie d'un refroidissement de -1,2°C, puis un réchauffement d'environ 1°C.

Les températures minimales à Constantine sont en augmentation à partir de 1959 d'environ 2°C. A Chleff la segmentation d'Hubert indique un refroidissement de - 1,1°C entre 1963 et 1976, puis un réchauffement d'environ 0,9°C à partir de 1977 et qui s'accroît en 1992.

Pour les températures maximales annuelles on relève une période de refroidissement d'environ -0,7°C à Alger et Oran à partir de 1969 et -1,5°C à Constantine à partir de 1960. Cette période est suivie d'un réchauffement qui devient plus important à partir des années 90. Selon le test de Pettitt, la station de Constantine connaît un refroidissement d'environ -1°C depuis 1959, les stations d'Alger et Chleff enregistrent un réchauffement de 0,9°C à partir de 1984, ce réchauffement est de 0,8°C à Annaba et 0,6°C à Oran.

10-2-3- Analyse des températures mensuelles

Pour déterminer la saison ou les mois qui influent le plus sur la variation interannuelle des températures nous avons soumis les séries mensuelles des cinq stations aux cinq tests de rupture. Cependant, nous présentons seulement les résultats du test de Pettitt et la segmentation d'Hubert, puisque les autres tests donnent le même résultat.

Le tableau suivant illustre l'année de rupture donnée par le test de Pettitt ainsi que la différence de moyenne avant et après l'année considérée, ainsi que les périodes de rupture données par la segmentation d'Hubert et la moyenne de chaque période.

Tests	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Alger												
Pettitt	-	1984	-	-	-	-	-	-	1984	1980	1980	1984
Différence (C°)	-	1,4	-	-	-	-	-	-	1,0	1,0	2,5	3,5
Périodes de rupture Hubert	1936-1964 1966-1979 1980-2008	1936-1984 1986-2008	-	-	-	-	-	-	1936-1991 1992-2008	1936-1984 1984-1980 1981-2008	1936-1980 1981-2008	1936-1984 1985-2008
Moyenne des périodes Hubert	23,3 22,4 23,3	19,1 20,5	-	-	-	-	-	-	17,8 19,0	22 20,9 22,4	24,2 25,5	25,1 28,6
Annaba												
Pettitt	-	1985	-	-	-	-	-	1979	1991	-	-	1984
Différence (C°)	-	0,8	-	-	-	-	-	1,0	1,2	-	-	0,9
Périodes de rupture Hubert	-	1936-1943 1944-1985 1986-2008	1936-1970 1971-1979 1979-2008	-	-	-	-	1936-1970 1971-1979 1980-2008	1936-1991 1992-2008	1936-1995 1996-2008	1936-1980 1981-2008	1936-1984 1985-2008
Moyenne des périodes Hubert	-	20,8 19,3 20,9	15,8 14,4 16,2	-	-	-	-	15,1 13,9 15,5	17,9 19,1	21,5 22,9	24,1 25,1	25,1 26,0
Oran												
Pettitt	-	2000	-	1975	-	-	-	-	-	1995	1986	1984
Différence (C°)	-	2,0	-	0,8	-	-	-	-	-	1,5	0,8	1,5
Périodes de rupture Hubert	-	1936-2000 2001-2008	-	1936-1975 1976-2008	-	-	1936-1968 1969-1975 1976-2008	1936-1965 1966-1980 1981-2008	1936-1940 1941-2008	1936-1995 1996-2008	1936-1975 1976-1980 1981-2008	1936-1975 1976-1984 1985-2008
Moyenne des périodes Hubert	-	19,1 21,1	-	11,4 12,3	-	-	13,8 12,2 14	15,7 14,8 16	16,9 18,7	21,8 23,3	24,8 23,5 25,4	25,5 24,4 26,5
Constantine												
Pettitt	-	1984	1981	-	-	-	-	-	1991	1980	1980	1984
Différence (C°)	-	1,9	0,9	-	-	-	-	-	2,1	-	1,4	1,4
Périodes de rupture Hubert	-	1937-1984 1984-2008	1937-1973 1974-1979 1980-2008	1937-1947 1948-2008	1937-1953 1954-2008	-	1937-1998 1999-2008	1936-1970 1971-1979 1980-2008	1937-1991 1992-2008	1937-1995 1996-2008	1936-1980 1981-2008	1937-1984 1985-2008
Moyenne des périodes Hubert	-	16,2 18,2	11,4 9,8 12	6,9 8,1	6,1 7,2	-	9,9 11,5	12,6 11 13	16,5 18,6	21,6 24,1	24,9 26,3	25,1 26,5
Chleff												
Pettitt	-	2000	-	1975	-	-	-	1948	-	1995	-	1984
Différence (C°)	-	2,8	-	1,1	-	-	-	-1,4	-	1,6	-	1,2
Périodes de rupture Hubert	-	1936-2000 2001-2008	-	1936-1975 1976-2008	-	-	-	1936-1948 1949-2008	1936-1990 1991-2008	1936-1984 1985-1995 1996-2008	1936-1967 1968-1980 1981-2008	1936-1984 1985-2008
Moyennes des périodes Hubert	-	20,1 22,9	-	10,9 12,0	-	-	-	17,5 16,1	20,2 21,5	26,1 24,8 27,0	29,4 28,3 29,7	28,9 30,1

Tableau 26 : Résultats des tests de rupture des températures mensuelles.

Le test de Pettitt et la procédure de segmentation d'Hubert indiquent, pour la plupart des stations, que ce sont les mois d'été ; mai, juin, juillet et Aout qui présentent une rupture très significative et coïncide avec la date de rupture annuelle. L'augmentation de température dépasse le plus souvent 1°C et peu atteindre 3°C.

À Alger, se sont les saisons d'automne et d'été qui indiquent une rupture. Le mois de septembre marque d'abord une période de refroidissement entre 1965 et 1979 avec une diminution de -1°C, puis un réchauffement d'environ 1,4°C (par rapport a la période de refroidissement). Le mois d'Octobre enregistre quant à lui une augmentation de 1,4°C à partir de 1984 ce qui coïncide avec la rupture annuelle.

En saison sèche, le mois de mai marque une augmentation des températures de 1°C à partir de 1985 selon le test de Pettitt, alors que la méthode de segmentation d'Hubert indique une augmentation plus importante à partir de 1992 d'environ 1,2°C. Au mois de juin, les températures passent d'abord par une période de refroidissement d'environ -1°C entre 1954 et 1980, avant de marquer une augmentation d'environ 1,5°C. Les mois de juillet et

Aout indiquent respectivement une augmentation des températures à partir des années 80 d'environ 2,5°C et 3,5°C. Pour Alger, l'été semble la saison qui influe le plus sur la variation des températures puisque les ruptures observées à l'échelle du mois coïncident avec celles observées pendant l'année.

A Annaba, se sont les saisons d'automne, de printemps et d'été qui enregistrent une augmentation des températures. Le mois d'octobre, indique un refroidissement entre 1944 et 1985 d'environ -1,5°C, puis une augmentation des températures de 1,6°C par rapport à cette période. Le mois de novembre est marqué, lui aussi, par un refroidissement d'environ -1,4°C, mais pendant les années 70. Cette période est suivie d'un réchauffement de 1,7°C. Au printemps, le moi d'avril enregistre d'abord un refroidissement d'environ -1,2°C durant les années 70, puis un réchauffement d'environ 1,6°C à partir de 1980. Le mois de mai indique un réchauffement d'environ 1,2°C à partir des années 90. En été, tous les mois indiquent une augmentation des températures, d'environ 1,4°C en juin, 1°C en juillet et 0,95°C en aout.

Nous pouvons constater que ce sont les mois d'Octobre, juillet et Aout qui présentent les mêmes tendances qu'à l'échelle annuelle.

A Oran, tous les mois de l'année indiquent un réchauffement, excepté, les mois de septembre, novembre, janvier et février. Le mois d'octobre indique un réchauffement de 2°C environ durant la dernière décennie. Le mois de décembre enregistre une augmentation des températures de 0,8°C à partir de 1975. Au printemps, les mois de mars et avril, indiquent respectivement un refroidissement d'environ -1,6°C et -1°C, puis un réchauffement d'environ 1,8°C et 1,2°C et le mois de mai enregistre une augmentation des températures d'environ 1,8°C à partir de 1941. En été, le mois de juin indique un réchauffement à partir de la moitié des années 90 d'environ 1,5°C.

Les mois de juillet et aout indiquent respectivement un refroidissement, entre la moitié des années 70 et début des années 80, d'environ -1,4°C et -1°C, puis un réchauffement d'environ 2°C pour les deux mois. Les ruptures observées pour les 12 mois de la station d'Oran diffèrent d'un mois à l'autre. Ces ruptures peuvent apparaitre durant les décennies 1970, 1980, 1990 et 2000. Dans l'ensemble se sont les mois de mars, avril, juillet et aout qui présentent la même variation qu'à l'échelle annuelle.

À Constantine, tous les mois indiquent une augmentation des températures à l'exception de septembre et février. Le mois d'octobre enregistre une augmentation des températures de presque 2°C à partir de 1984. Le mois de novembre indique un refroidissement d'environ -1,6°C entre 1974 et 1979, puis un réchauffement de plus de 2°C à partir de 1980 par rapport à la période de refroidissement.

Les mois de décembre et janvier indiquent respectivement une augmentation des températures à partir de 1948 et 1954 d'environ 1,2°C et 1°C. Le mois de mars indique une augmentation de 1,6°C des températures à partir de 1999. Le mois d'avril est marqué par un refroidissement d'environ -1,6°C durant les années 70, puis un réchauffement de 2°C à partir de 1980. Les mois de juin et juillet indiquent respectivement un réchauffement à partir des années 90, d'environ 2°C et 2,5°C. Les mois de juillet et aout indiquent une augmentation des températures à partir des années 80 d'environ 1,4°C. Les mois d'octobre, juillet et aout sont les seuls à présenter une variation mensuelle proche de la variation annuelle des températures à Constantine.

À Chleff, c'est la saison sèche qui enregistre une forte augmentation des températures, en plus des mois d'octobre et décembre. Le mois d'octobre est caractérisé par un réchauffement très important d'environ 3°C à partir de 2001 et le mois de décembre par une augmentation de 1°C à partir de 1976. Le mois d'avril indique un refroidissement d'environ

1,5°C à partir de 1949 et le mois de mai un réchauffement d'environ 1,2°C à partir de 1991. Les mois de juin et juillet indiquent respectivement un refroidissement d'environ -1,3°C et -1,1°C à partir de 1955 et 1968, puis un réchauffement de 2,2°C et 1,4°C à partir de 1996 et 1981. Le mois d'août est marqué par un réchauffement d'environ 1,2°C, à partir de 1985. Les mois de juillet et août indiquent la même variation qu'à l'échelle annuelle.

10-3- Détection d'une périodicité par l'analyse spectrale des températures

La procédure d'analyse spectrale permet d'identifier le comportement périodique des séries chronologiques. Au lieu d'analyser la variation d'un point à un autre, elle permet d'analyser la variation de la série dans son ensemble en tant que composantes périodiques des fréquences différentes.

Nous avons déterminé la densité spectrale pour les séries de températures. Les graphes suivants présentent les densités spectrales (périodogramme lissé) d'amplitude spectrale (sur une échelle linéaire) par rapport à une période (année).

Pour estimer la densité spectrale, nous avons utilisé le mode de lissage Tukey-Hamming obtenu par le logiciel SPSS. Ainsi, les pics les plus forts, du périodogramme ou de la densité peuvent aisément être identifiés dans les longues séries.

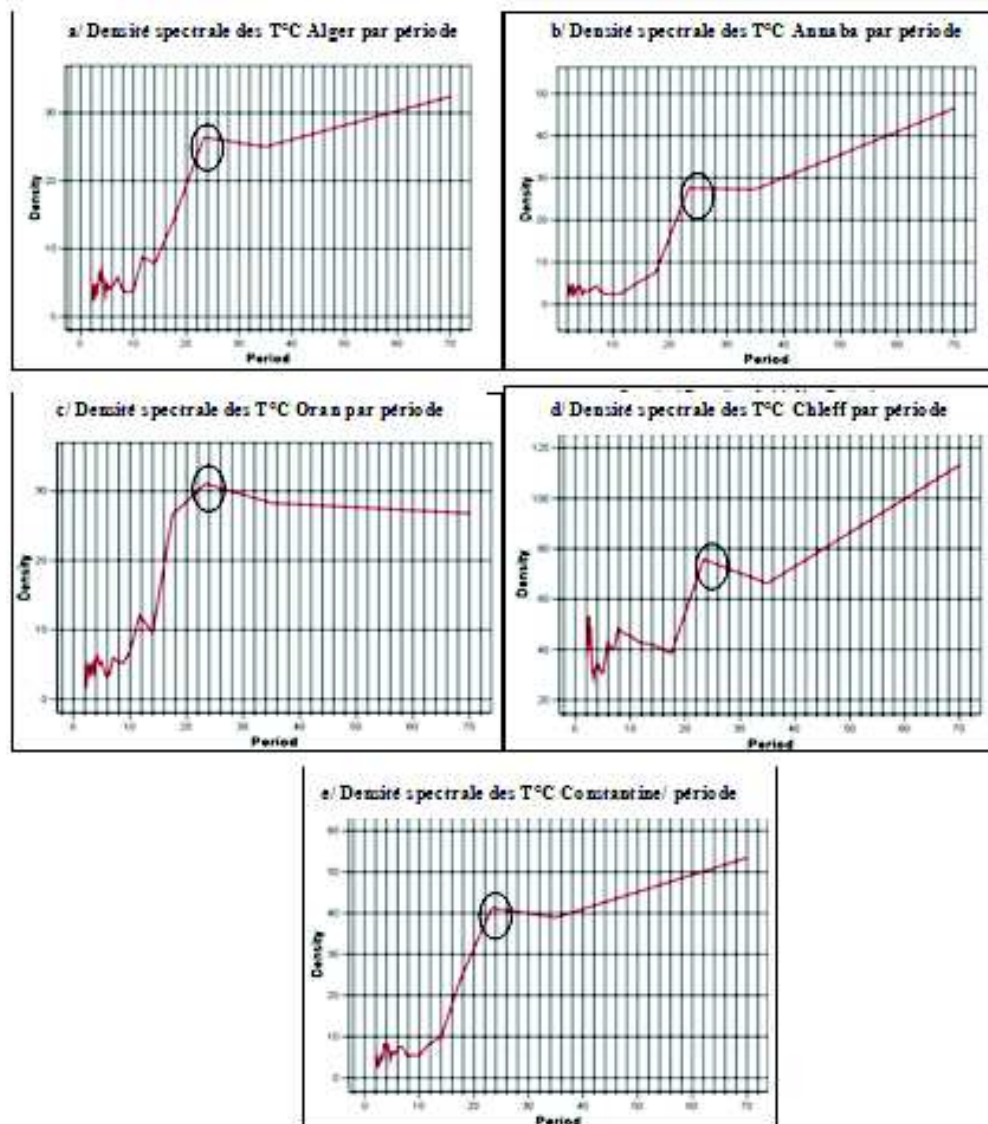


Figure 100 : Densité spectrale des températures par période.

Tous les graphes indiquent un pic important à une période d'environ 24 ans (entre 22 ans et 24 ans). Cette périodicité semble coïncider avec les tests de rupture et la moyenne mobile. Selon le test de Pettitt le réchauffement a commencé entre 1980 et 1984 jusqu'à 2008 (environ 24ans). Sachant que cette période est précédée d'une période de refroidissement entre les années 1960 et 1984 selon la segmentation d'Hubert et la moyenne mobile. Donc, si nous suivons cette périodicité, et en tant que *phénomène cyclique naturel*, les températures des 24 prochaines années devraient baisser et non pas augmenter.

10-4- Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les données de températures dans le but de caractériser essentiellement les individus (années).

Les résultats de l'ACP montrent que les cinq premières composantes expliquent la totalité de la variance. La première composante de l'ACP sans rotation explique environ 80% de la variance totale.

Composantes	C1	C2	C3	C4	C5
% variance	79,7	8,9	4,9	3,5	3,0
% cumulé	79,7	88,6	93,5	97,0	100,0

Tableau 27 : Résultats de l'analyse en composantes principales des températures.

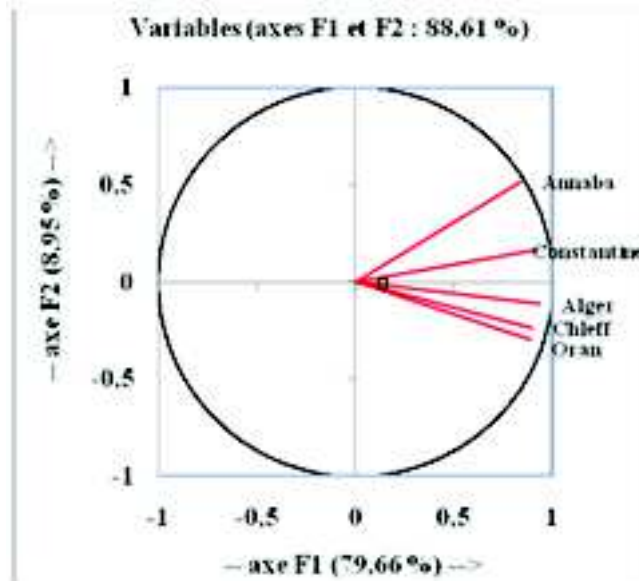


Figure 101 : Cercle de corrélations des températures.

Le cercle de corrélation montre une répartition spatiale d'Est en Ouest des stations.

L'ACP sans rotation indique que toutes les stations sont corrélées positivement avec la première composante (coefficient de corrélation environ 90%). La deuxième composante caractérise la variabilité interannuelle des températures de Annaba, la troisième composante explique les températures d'Oran et Chleff. La quatrième composante caractérise les températures de Constantine et la cinquième composante celles d'Alger.

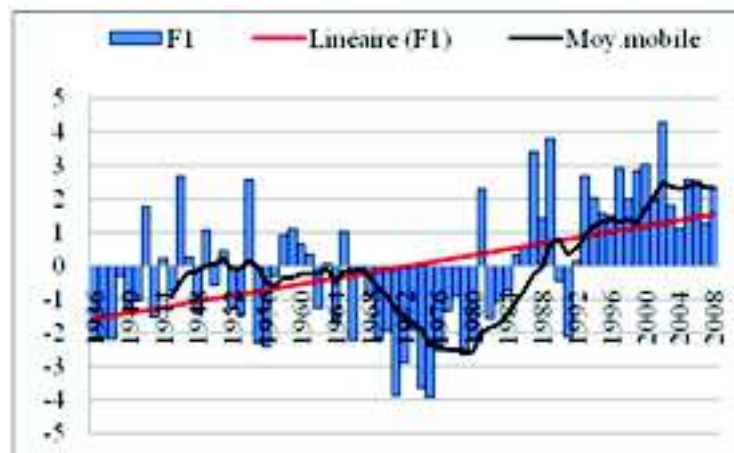


Figure 102 : Chronique temporelle de la première composante des températures

La chronique temporelle associée à la première composante, met en évidence une période avant 1964 caractérisée par l'alternance d'années chaudes et froides moins accentuée, suivie d'une période de refroidissement entre 1964 et 1984. À partir de 1985, les températures n'ont cessé de croître surtout à partir de 1993 pour atteindre leur maximum en 2002. Cette augmentation semble prendre fin, puisque une stabilité des températures s'installe dès lors.

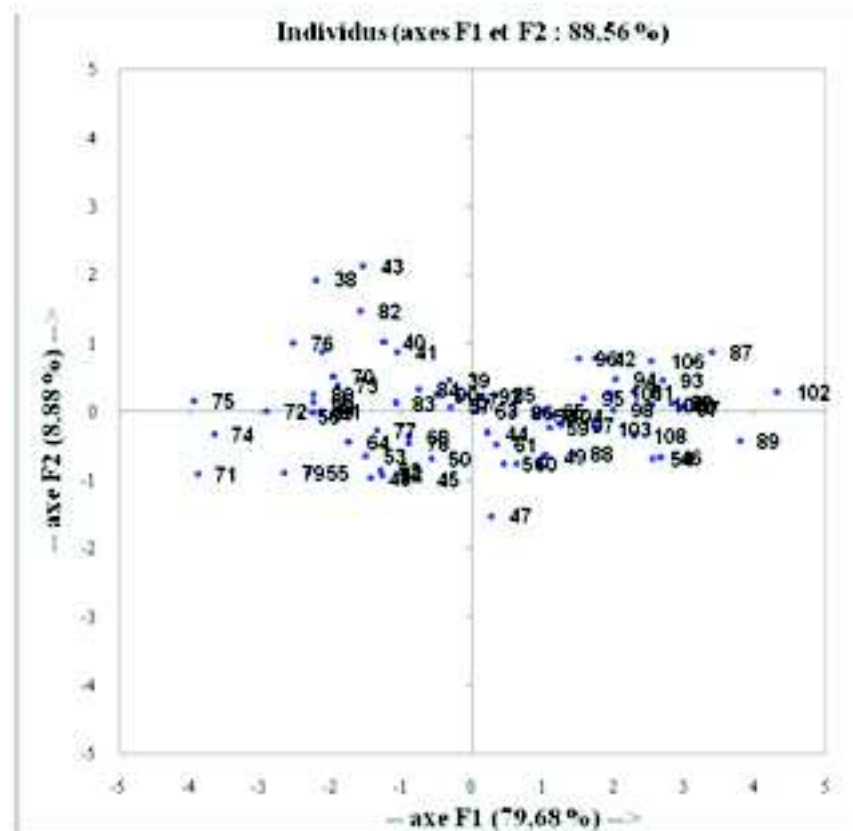


Figure 103 : Projection des individus sur les deux premières composantes.

La projection des individus (années) sur les deux premières composantes montre que :

Les individus dont les coordonnées sont positives sur l'axe 1 sont les années chaudes.

Nous retrouvons les températures maximales de 1989 et 2002 et notamment les années les plus chaudes de 1992 à 2002.

Les individus dont les coordonnées sont négatives sur l'axe 1 sont les années douces ou froides. Nous retrouvons par exemple, les années 1960 à 1980 qui correspondent à la période de refroidissement qu'ont connu les différentes stations.

Conclusion

L'analyse de la tendance des séries annuelles de température par régression linéaire révèle une augmentation à partir de la moitié des années 70. Le test de Pettitt quant à lui, indique une augmentation de plus de 0,5°C à partir des années 80. La tendance des températures minimales et maximales annuelles suit dans l'ensemble la tendance des températures annuelles. À l'échelle saisonnière, il apparaît que ce sont les mois d'été qui influent sur la variation annuelle des températures.

La segmentation d'Hubert met en évidence une période de refroidissement entre les années 60 et 80 suivie d'une période de réchauffement. L'analyse des températures annuelles par la moyenne mobile pour une période de 10ans fait ressortir trois phase ; une phase descendante à partir de la fin des années 60, suivie d'une phase ascendante à partir de 1980 qui atteint son maximum en 2002. Depuis 2002 une stabilisation des températures est observée. L'analyse spectrale par période fait ressortir une périodicité de 24 ans, ce qui anticipe une baisse des températures au cours des deux prochaines décennies.

L'analyse en composantes principales n'a fait que confirmer les résultats des méthodes précédentes. La projection des individus oppose les années chaudes et les années froides.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail une analyse de l'évolution du climat du Nord de l'Algérie a été évaluée à travers deux paramètres importants; les précipitations et les températures sur une période d'observations de soixante treize ans (1936-1937/2008-2009).

Pour ce faire, nous avons défini une méthodologie pour chaque paramètre (pluie et température). La recherche d'une tendance ou d'un changement dans les séries temporelles des précipitations et des températures a été effectuée par les différents tests de rupture. L'indice pluviométrique a été ensuite utilisé pour caractériser les périodes sèches et humides ainsi que leur degré de sévérité, et la moyenne mobile pour caractériser les périodes de réchauffement et de refroidissement.

Nous avons utilisé aussi les chaînes de Markov pour l'étude de l'occurrence des pluies journalières, et la densité spectrale pour la recherche d'une périodicité des températures. Enfin, pour caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des températures, nous avons utilisé l'Analyse en Composantes Principales.

L'analyse du régime pluviométrique par les tests de rupture a révélé une tendance à la baisse des précipitations, observée entre la fin des années 60 et début des années 80. Par contre, cette baisse n'est pas généralisée sur toute la zone d'étude; à l'Est aucune rupture du régime pluviométrique n'est observée, la méthode de segmentation d'Hubert indique même une augmentation considérée des précipitations à partir de 2002, tandis qu'à l'ouest une baisse importante des précipitations est enregistrée et qui dépasse le plus souvent 25%. Cette baisse est moins importante dans les régions centre de la zone d'étude (elle ne dépasse pas 20%).

À l'échelle saisonnière, la rupture est importante en hiver et coïncide avec la rupture annuelle. Tandis qu'elle n'apparaît que pour certaines stations en automne, et certaines stations Ouest au printemps. En été, ce sont les stations côtières Centre et Ouest qui indiquent une tendance à la baisse, mais cette baisse n'a aucun effet sur les pluies annuelles.

La forte variation du régime pluviométrique au Nord Algérien, peut être expliquée par deux facteurs déterminants : climatique et géographique. D'une part, la circulation atmosphérique générale et précisément l'oscillation nord atlantique qui influence le climat ; par sa phase positive cette oscillation a provoqué les sécheresses qu'a connu le pays à partir de la moitié des années 70. D'autre part, le relief qui joue un rôle important dans la répartition des précipitations, du fait qu'il varie considérablement d'Ouest en Est. C'est ainsi, que les différentes régions de la zone d'étude sont touchées par des degrés différents de sévérité de la sécheresse.

L'indice pluviométrique standardisé (SPI) a permis de ressortir deux périodes bien définies ; une période excédentaire entre 1936 et 1975, et une période déficitaire entre 1976 et 2001 qui caractérise la sécheresse. Cette baisse confirme les résultats obtenus par les tests de rupture. Une troisième période est observée à partir de 2002, elle indique une augmentation importante des précipitations à l'Est de la zone d'étude, et un retour vers la normale au Centre et à l'Ouest.

L'étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations par l'analyse en composantes principales (ACP), a mis en évidence à l'échelle spatiale cinq régions qui présentent un comportement différent du régime pluviométrique au long de la période 1936-1937/2008-2009; la région centre littorale expliquée par la première composante avec rotation, les deux régions Est et Ouest littorales expliquées par la deuxième composante, la région des hauts plateaux Est expliquée par la troisième composante et la région des hauts plateaux ouest et centre expliquée par la quatrième composante. À l'échelle temporelle, les résultats de l'ACP coïncident avec les tests de rupture et l'indice pluviométrique.

À l'échelle saisonnière, nous retrouvons dans l'ensemble les mêmes régions d'une saison à l'autre, mais qui ne sont pas expliquées par les mêmes composantes. La tendance des chroniques temporelles coïncide avec les résultats des tests de rupture pour les quatre saisons et l'hiver apparaît le plus déficitaire surtout à l'Ouest.

L'analyse en composantes principales des trois périodes déterminées par l'indice pluviométrique révèle que la régionalisation n'a pas changé au cours de la période 1936-1975. Pendant la deuxième période 1976-2001, le centre et l'est littoral sont expliqués par la même composante, ceci montre qu'ils ont connu le même comportement pluviométrique durant cette période. Le littoral Ouest est expliqué par sa propre composante vu le déficit important qu'a connu cette région par rapport aux autres régions durant cette période.

Pour la période 2002-2008, toute la région Ouest est expliquée par la première composante. Cette région connaît un retour des précipitations vers la normale et marquée par les fortes pluies de 2008-2009. La deuxième composante caractérise les hauts plateaux Est, la troisième composante explique le centre littoral caractérisé par une période normale et la quatrième composante caractérise l'Est littoral qui connaît une augmentation des précipitations durant cette période.

À l'échelle journalière, l'analyse du régime pluviométrique par les chaînes de Markov n'a montré aucun changement significatif des probabilités conditionnelles et inconditionnelles d'occurrence des jours secs et pluvieux. Nous déduisons alors, qu'il s'agit surtout d'une diminution quantitative des précipitations durant la période sèche et l'absence de décalage saisonnier.

L'analyse des températures annuelles par le test de Pettitt indique une tendance à l'augmentation à partir des années 80. Cette augmentation est de 0,7°C à Oran, Chleff, Alger et Annaba et de 1°C à Constantine. Les températures minimales et maximales annuelles suivent aussi la même tendance. À l'échelle mensuelle, ce sont les mois d'été qui présentent une augmentation importante des températures et influent sur la variation annuelle.

La segmentation d'Hubert et la moyenne mobile mettent en évidence une période de refroidissement entre les années 60 et 80, la décennie la plus froide étant 1970-1980 avec un refroidissement d'environ $-0,7(\pm 0,1)$ °C. Dès lors une phase ascendante des températures est observée, elle atteint son maximum en 2002, la décennie 1992-2002 étant la plus chaude avec un réchauffement de $0,7(\pm 0,2)$ °C. À partir de 2002 une stabilité des températures est observée.

La période (2002-2008) -si courte qu'elle soit- est le plus souvent négligée dans les études précédentes du régime pluviométrique, mais peut être pertinente puisque elle nous renvoie vers une question importante :

· Est-ce la fin de la sécheresse en Algérie ?

Les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées pour l'analyse du régime climatique du Nord Algérien, montrent dans l'ensemble une tendance à la baisse des précipitations et une tendance à l'augmentation des températures à partir de la moitié des années 70. Cette tendance coïncide avec la variation de l'oscillation nord atlantique qui a connu une phase positive à partir des années 1970, engendrant une augmentation des températures et des sécheresses.

Ces résultats coïncident avec plusieurs autres études (Xoplaki E, 2004 ; Meddi M., 2010 ; Khaldi A, 2005, Norrant C, 2007). Le GIEC (2007) explique cette tendance par l'émission des gaz à effet de serre qui a commencé à croître à partir des années 50 et prédit une hausse de plus de 4°C au cours de ce siècle.

Alors que nous assistons à une reprise des précipitations depuis 2002 (une augmentation à l'est et un retour vers la normale au centre et à l'Ouest), qui coïncide avec la stabilité des températures. La NAO est entrée en phase négative depuis 2008, date qui peut être le début d'une période de refroidissement selon la périodicité des températures obtenue par l'analyse spectrale. Les plus grands chercheurs Vincent Courtillot et Mojib Latif ainsi que d'autres prévoient une période de refroidissement durant les 10 à 20 prochaines années.

Pour un pays semi-aride comme l'Algérie, la relation précipitations-températures est très importante. Dans certaines circonstances, nous pouvons relever l'absence de corrélation entre ces deux variables. La décennie 1970-1980 était la plus froide, alors que le Nord Algérien a connu des sécheresses hydrologiques importantes durant cette période surtout l'Ouest (1976-1986). À partir de 1980, les températures sont en augmentation. Cette phase caractérise les années très déficitaires de la décennie 1986-1996 jusqu'à 2001. Dans ce cas, l'influence des températures sur les ressources en eaux devient pertinente. Une forte température peut engendrer une évaporation importante et rapide. En cas de sécheresse ceci aura des conséquences sur les eaux superficielles, les eaux de barrages, voire même les eaux souterraines.

C'est dans ce sens qu'un intérêt général doit être accordé pour faire face à d'éventuelles périodes sèches dans le but de satisfaire les besoins en eau potable, de l'agriculture et de l'industrie face à une population qui ne cesse d'augmenter. Pour cela des mesures d'adaptation doivent être prises en considération. Suite à la sécheresse, l'Algérie a connu un développement très important dans le secteur de l'eau, en outre : la construction de nouveaux barrages, la réutilisation des eaux non conventionnelles, la réalisation de plusieurs stations de dessalement le long du littoral Algérien ainsi que les transferts hydriques. Ces efforts ne suffisent pas toujours, une sensibilisation du public est nécessaire pour protéger et préserver la ressource en eau et l'environnement.

Au terme de ce travail, nous pouvons dire que, du point de vue agronomique, le suivi des précipitations et des températures est très important au long du cycle végétatif de la plante, c'est à dire au pas de temps journalier. Les besoins en eau nécessaires diffèrent d'un stade végétatif à l'autre.

La répartition irrégulière des précipitations d'une saison à l'autre et d'une année à une autre fait que souvent les pluies ne tombent pas au moment où la plante en a le plus besoin. Dans ce cas, une analyse approfondie des précipitations à l'échelle journalière en fonction des besoins en eaux de la culture (par exemple, en modifiant le seuil de précipitations des chaînes de Markov en fonction des besoins de chaque stade végétatif) est très intéressante, pour mieux gérer le calendrier agricole.

Une modélisation à l'échelle du bassin versant en tenant compte des différentes composantes du bilan hydrique peut être très utile pour la prévision et le contrôle des sécheresses à court et à moyen terme.

Références bibliographiques

- Abdou A., Lebel T., Abou A., 2008.** Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse*, vol. 19, n. 4, p 227-235.
- Abdulla F., Eshtawi T., Assaf H., 2009.** Assessment of the Impact of Potential Climate Change on the Water Balance of a Semi-arid Watershed. *Water resour manage*, n.23, p 2051-2068.
- Aesawy A.M., Hasanean H.M., 1998.** Annual and seasonal climatic analysis of surface air temperature variations at six southern mediterranean stations. *Theoretical and applied climatology*, n.61, p 55-58.
- Amraoui L., 2009.** Évolution hivernale des températures de surface en relation avec les pressions atmosphériques et les vents de surface en Afrique du Nord-Ouest et le proche océan pendant la période 1950-2008. *Geographia Technica*, numéro spécial, p. 41-46
- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N., 2005.** Hydrologie. École polytechnique de Montréal, Presse polytechnique de Montréal, 287p.
- ANRH, 2009.** Impact des changements climatiques sur les ressources en eaux. Note de synthèse, 12p.
- Assaba M., 2004.** La connaissance des pluies mensuelles au service de la modélisation hydrologiques des apports mensuelles en eau de surface : Application à l'Algérie du Nord, au sud de la France et à la Corse. Thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, France, 399p.
- Beaulieu C., Ouarda T.B.M.J., Seidou O., 2007.** Étude comparative de méthodes d'homogénéisation des séries de précipitations. Rapport de recherche, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau), Québec, 79p.
- Bekkoussa B., Meddi M., Jourde H., 2008.** Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *sécheresse*, vol.18, n.3, p 173-184.
- Benalaya A., Sebei H., De Troch F., Troch P., Ennabli N., 1994.** Estimation des périodicités et de la tendance des températures moyennes mensuelles en Tunisie. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol.39, n.6, p 593-603.
- Benassi M., 2001.** Drought and climate change in Morocco. Analysis of precipitations field and water supply. *Options Méditerranéennes*, série A, n.80, p 83-86.
- Bennis S., 2007.** Hydraulique et hydrologie. Université du Québec, école de technologie supérieure, Presse de l'université du Québec, 415p.
- Berchtold A., 1998.** Chaines de Markov et modèles de transition. Université de Genève, Lavoisier, p13-63.
- Bergaoui Z., Kingumbi A., Bourges J., Hubert P. et Kallel R., 2000.** Étude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie Centrale, 8p.

- Boucherf D., 2007.** Variabilité et changement climatique en Algérie. Actes des journées internationales sur l'impact des changements climatiques sur les régions arides et semi-arides, p 109-124.
- Boucherf D., 2010.** Étude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie. Thèse de magister, université USTHB, Alger, 144p.
- Camberlin, P., 1994.** Les précipitations dans la corne orientale de l'Afrique : climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs océano-atmosphériques. Thèse de Doctorat, université de Bourgogne, 379p.
- Cassou C., 2004.** Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. *Météorologie*, n.24, p 21-32.
- Changchun X., Yaning C., Weihong L., Yapeng C., 2006.** Climate change and hydrologic process response in the Tarim River Basin over the past 50 years. *Chinese Science*, vol. 51, p 25-36.
- Combourieu Nebout N., Bout-Roumazeilles V., Dormoy I., Peyron O., 2009 .** Science et changements planétaires / Sécheresse., n. 2, V. 20, p 210-216.
- Dechemi N., Ait Mouhoub D., Souag D., 2000.** Contribution à l'analyse du régime pluviométrique sur le littoral algérien. *Sécheresse*, vol.11, n.1, p 5-10.
- Demmak A., Ould Amara A., 2001.** La sécheresse en Algérie des années 1970/1990 et son impact sur les ressources en eau. Table ronde : sécheresse-changement climatique-désertification, 10p.
- Djellouli Y., 2007.** Impacts des changements climatiques dans les zones arides au Maghreb. Actes des journées internationales sur l'impact des changements climatiques sur les régions arides et semi-arides, p 27-49.
- Duby C., Robin S., 2006.** Analyse en composantes principales. Institut National Agronomique Paris, Grignon, 54p.
- Faucher D, Ouarda T.B.M.J., Bobée B., 1997.** Revue bibliographique des tests de stationnarité. Rapport de recherche, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau), Québec, 73p.
- Ficklin D.L., Luo Y., Luedeling E., Zhang M., 2009.** Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, vol.374, p 16-29.
- Gautier F., Lubes-Niel H., Sabatier R., Masson J. M., Paturel J. E., Servat E., 1998.** Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. *Journal des sciences hydrologiques*, vol.43, n.6, p921-935.
- Giddings L., Soto M., 2005.** Standardized precipitation index zones from Mexico. *Atmosfera*, p 33-56.
- GIEC, 2001.** Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques, Rapport de synthèse, n.3, 97p.
- GIEC, 2007.** Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse n.4, 114p.
- Guttman N. B., 1998.** Comparing the Palmer drought index and The standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, n.1, p113-121.

- Hassani M.I., 2008.** Climat et ressources en eau au Maghreb. Tendances et impacts du changement global. Eaux et climat en Afrique, 24-28 Juin 2008 Kampala, Uganda
- Hayes M.J., Svoboda M.D., Wilhite D. A., Vanyarkho O.V., 1999.** Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 80, n. 3, p. 429-438.
- Hôte Y., 2003.** Une sécheresse persistante au Sahel. Sciences au Sud - Le journal de l'IRD-, p.3
- Huang Y., Cai J., Yin H., Cai M., 2009.** Correlation of precipitation to temperature variation in the Huanghe River (Yellow River) basin during 1957–2006. Journal of Hydrology, vol. 372, p 1-8.
- Immediato H., 2001.** Cours de statistiques. Université Claude Bernard - Lyon 1, 57p.
- Jacques G., 2001.** Les variations du climat. Cycle de conférences, université de Perpignan, Paris, 17p.
- Jouzel J., Debroise A., 2007.** Le climat : jeu dangereux, dernières nouvelles de la planète. Dunod, Paris, 220p.
- Kanohin F., Saley M. B., 2009.** Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zone tropicale humide: Cas de la Région de Daoukro en Côte D'ivoire. European Journal of Scientific Research, vol.26, n.2, p 209-222.
- 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, Algérie, 239p.
- Kumar M., Christopher J. D., 2009.** Detecting hydroclimatic change using spatio-temporal analysis of time series in Colorado River Basin. Journal of Hydrology, vol. 374, p 1-15.
- Larousserie D., 2010.** Climat : six points de crispation sur le réchauffement. Sciences et avenir, p12-13.
- Leroux M., 2007.** Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Rapport de laboratoire de climatologie, Risques, Environnement, université Jean-Moulin, Lion, 12p.
- Lazri M., Ameur S., Haddad B., 2006.** Analyse des données de précipitations par approche markovienne. Larhyss Journal, n.6, p 7-20.
- Lebel T., Ali A., 2009.** Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). Journal of Hydrology, vol. 375, p 52-64.
- Leroux M.M., 2002.** Global Warming: mythe ou réalité. L'évolution réelle de la dynamique du temps. Annales de Géographie, v. 111, n. 624, p 115-137.
- Lopez J., Frances F., 2010.** Influence of the North Atlantic Oscillation and the western mediterranean oscillation in the maximum flow events in Spain. International workshop advances in statistical hydrology, may 23-25, 2010 taormina, Italy.
- Lubès-Niel H., Paturel J. E., Servat E., Masson J. M., 1998.** Variabilité climatique et statistique : étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques

- tests utilisés pour vérifier l'homogénéité des chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, n.3, p 383-408.
- Matari A., Latrous H., El Mahi A., 2007.** Analyse de longues séries en vue du changement climatique. Actes des journées internationales sur l'impact des changements climatiques sur les régions arides et semi-arides, Biskra, p 15-25.
- Matteau M., Assani A. A., Mesfioui M., 2009.** Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology*, vol. 371, p 120-128.
- Meddi H., Meddi M., 2007.** Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Géographia Technica*, n° 2, p 49-55.
- Meddi H., Meddi M., 2009.** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, n.1, v.20, p 57-65.
- Medjerab A., 2005.** Étude pluviométrique de l'Algérie Nord-Occidentale. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et Aménagement du Territoire, USTHB, Alger, 569p.
- Mizyed N., 2009.** Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the West Bank. *Water resour manage*, n.23, p 2015-2029.
- Morell M., 1998.** Le système méditerranéen d'observation du cycle hydrologique Med-Hycos. Congrès International de Kaslik, Liban.
- Nalbantis I., Tsakiris G., 2009.** Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water resour manage*, n.23, p 881-897.
- Nikulin M., Bagdonavicius V., Huber C., Nikoulina V., 2004.** Cours de statistiques mathématiques : Modèles, Méthodes et applications. Université Victor Segalen, Bordeaux, 409p.
- Norrant C., 2007.** Relations entre le niveau du géopotential 500 hPa de l'hémisphère nord et les précipitations du bassin méditerranéen (1950-2000). *Climatologie*, v.4, p 91-104
- Norrant C., Douguédroit A., 2003.** Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen. *Annales de géographie*, vol.112, n.631, p 298-305.
- Nouaceur Z., 2009.** Évolution des précipitations depuis plus d'un demi-siècle en Mauritanie. *Geographia Technica*, numéro spécial, p 361-366.
- Ondo J.C., 2002.** Étude comparative des tests de stationnarité. Thèse de doctorat, université du Québec, INRS-Eau Terre et Environnement, Canada, 288p.
- Ondo J.C., Ouarda T.B.M.J., Bobée B., 1997.** Revue bibliographique des tests d'homogénéité et d'indépendance. Rapport de recherche, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau), Québec, 85p.
- Paturol J.E., Boubacar I., L'Aour A., 2004.** Évolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'ouest et centrale au 20ème siècle. *Sud sciences et technologie*, n.13, p 40-46.
- Paturol J. E., Servat E., Delattre M.O., Lubès-Niel H., 1998.** Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne

- dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des sciences hydrologiques*, n.43, p 937-946.
- Paturel J.E., Lubès H., et al, 1999.** De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, n.12, p 363-389.
- Pfister L., 2004.** Spatial variability of trends in the rainfall-runoff relationship : a mesoscale study in the Moselle basin. *Climatic change*, n.66, p 67-87.
- PNUD, 2009.** Évaluation du risque climatique en Algérie. Seconde communication nationale de l'Algérie. Rapport d'étude, 55p.
- PNUD, 2009.** Vulnérabilité des bassins versants Algériens aux changements climatiques. Seconde communication nationale de l'Algérie. Rapport d'étude, 39p.
- Renard B., 2006.** Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble (INPG), France, 351p.
- Ricard J.L., 2000.** Impacts régionaux d'El Niño : sur l'Europe et le bassin Méditerranéen. Météo- France - CNRM/GMGE, Toulouse.
- Robert C., 1996.** Méthodes de Monte Carlo par les chaînes de Markov. *Economica*, p 91-123.
- Robson A. J., Zbigniew W. K., 2004.** Change detection in hydrological records : a review of the methodology. *Journal des sciences hydrologiques*, vol.49, n.1, p7-19.
- Rossel R., Garbrecht J., 2000.** Analyse et amélioration d'un indice pluviométrique mensuel régional pour les grandes plaines du sud des États-Unis. *Revue des sciences de l'eau*, vol.13, n.1, p 39-46.
- Salameh T., 2008.** Modélisation multi-échelles de la circulation atmosphérique hivernale sur le bassin méditerranéen : rôle des interactions d'échelles. Thèse de doctorat, école polytechnique, France, 156p.
- Salinger M.J., 2005.** Climate variability and change : past, present, and future. *Climatic change*, n.70, p 9-29.
- Sambou S., Diémé Y., Touré A.K., Badji A.M., 2009.** Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique. *Science et changements planétaires/ sécheresse*, vol.20, n.1, p 104-111.
- Shaban A., 2009.** Indicators and Aspects of Hydrological Drought in Lebanon. *Water resource management*, n.23, p 1875-1891.
- Szalai S., 2003.** Oscillation Nord Atlantique. Hungarian Meteorological Service.
- Tchiadieu, G., 2000.** Calendriers des pluies et bilans hydriques au Cameroun (1951-1993). Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne, 208p.
- Underwood F.M., 2009.** Describing long-term trends in precipitation using generalized additive models. *Journal of Hydrology*, vol. 364, p 285-297.
- Vannistem S., Demarée G., 1991.** Détection et modélisation des sécheresses au Sahel : proposition d'une nouvelle méthodologie. *Hydrological Continental*, vol.6, n.2, p 155-171.

Xiong L., Guo S., 2004. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. *Journal des sciences hydrologiques*, n.49(1), p 99-112.

Xoplaki E., Gonzalez-Rouco J. F., Luterbacher J., Wanner H., 2004. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. *Climate dynamics*, n.23, p 63-78.

Xoplaki E., Luterbacher J., Patrikas J., Maheras P., 2000. Les précipitations hivernales en Grèce et leurs relations avec la circulation atmosphérique au niveau de 500 hPa. *Climate Research*, v.14, p 129-146.

Yue S., Pilon P., 2004. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Journal des sciences hydrologiques*, vol.49, n.1, p 21-37.

Sites internet

www.CNRS.fr

www.laterredufutur.com

www.laclimatologie.free.fr

Annexe

Annexe 01 : Caractéristiques statistiques de toutes les stations pluviométriques.

Code	Nom des stations	Moyenne	Ecart-type	Cv	Min	Max
10703	RECHAGA	267,94	84,85	0,32	107,20	494,50
10704	KSAR OUELLALA	244,12	93,91	0,41	51,60	479,20
10803	MEHDIA	371,54	101,23	0,27	141,60	732,20
10901	SOUGEUR	341,25	118,89	0,32	115,50	790,50
11003	COLONEL BOUGARA	320,18	74,77	0,23	145,00	525,00
11004	KHENISTI	370,54	179,04	0,47	37,70	629,47
11202	DERRAG	539,21	157,00	0,29	180,64	1152,82
11404	ZOURIA	227,33	128,21	0,56	238,40	493,20
11406	TENEH EL HAD	536,31	158,21	0,29	43,40	799,87
11803	SIDI MEDJAHED	699,47	185,74	0,27	370,10	1208,10
12403	SIDI HASSA	355,02	136,24	0,38	138,40	603,47
12406	ABDI MOUSSA	376,93	106,91	0,28	182,20	617,70
12703	KEVENDA FERME	418,33	169,47	0,40	102,50	894,00
12804	SIDI LAHDIR	320,65	113,04	0,35	159,60	786,20
13004	AN EL HADID	350,69	104,91	0,30	184,80	605,70
13404	SM BENAOUCHA	255,04	66,31	0,27	141,40	423,02
13606	TIZI	533,92	139,49	0,26	174,20	1111,90
13606	MEURAD BGE	654,35	148,62	0,23	377,10	1184,60
13612	CHEFCHILLI PHARE	584,11	129,39	0,22	178,24	947,50
13613	SIDI CHELES	631,07	168,00	0,27	341,60	1058,61
13615	GOURAYA	576,65	137,44	0,24	275,00	983,40
13406	FOUKA VILLE	558,11	187,68	0,34	180,00	1040,50
13609	ERMANOURES ANSH	759,27	190,20	0,25	431,00	1245,40
13611	MAHELEMA FERME	652,33	149,98	0,23	336,60	1122,50
13601	DEUX BASSINS	728,21	241,23	0,32	286,10	1335,40
13602	HAMIZ BARRAGE	759,85	207,46	0,27	341,60	1389,20
13607	PEPNIERE D'ALGER	639,92	190,40	0,30	246,50	1216,07
13608	BEJAJA	850,03	200,31	0,24	455,80	1173,40
13614	OUED ZEROUED	569,24	154,58	0,27	282,50	951,70
13617	BOUMEDFAA AP	512,04	132,82	0,26	236,70	961,07
13620	ANBEL EL AN	588,25	169,38	0,29	217,10	1014,00
13115	EL BAHDANIA	215,51	205,45	0,93	407,60	1452,60
13200	BOUFARK PEPNIERE	648,69	146,27	0,23	384,70	1087,38
13403	LARBAA	680,68	217,02	0,32	201,10	1347,20
13401	AGREBS	1079,20	283,02	0,26	631,10	1833,30
13706	LARBA NATH RATHEN	927,70	241,87	0,27	522,70	1393,10
13401	BOUSSANI	867,31	107,24	0,12	508,00	1389,62
13403	BOUCHI	799,41	193,54	0,24	431,60	1351,70
13602	BAGHLI VILLAGE	793,23	199,44	0,25	456,90	1339,60
13614	ANGOUERAS	586,24	160,02	0,27	253,60	1015,50
13606	AN ROUA	589,15	151,58	0,21	350,20	918,10
13601	JUEL SECUR	927,38	193,24	0,21	398,50	1347,20
13602	TERENA	1188,89	278,54	0,23	646,69	1924,90
13604	FARH	974,71	196,49	0,20	513,53	1410,50
13606	EL HAREFOUCH	578,08	134,20	0,23	179,50	932,20
13609	ZANDANE DIADEL	602,64	127,70	0,21	358,20	1200,47
13202	BEFRAHAL	658,23	147,93	0,23	299,19	1045,21
13103	BOU HADJAR	624,26	195,94	0,31	155,90	1100,80
14003	SIDI BOUVENANE	411,84	120,49	0,29	142,40	654,10
14004	MARSA BENI HIDI	333,21	132,42	0,40	54,00	494,83
14003	OUED BERKECHE	408,72	101,20	0,25	177,72	625,00
14001	BOUSFER	414,60	178,15	0,42	44,40	789,50
14002	ES SENIA ANSH	386,64	87,32	0,23	122,44	561,00
14006	TANDOUZAH	388,89	114,02	0,29	140,44	729,60
14006	AN EL ARBA	354,10	95,69	0,27	79,90	583,50
14015	HAMDANI BOU HADJAR	374,44	118,80	0,32	171,21	640,50
14018	TLELAT BARRAGE	277,48	112,29	0,41	92,60	541,50
14002	ORAN PEPNIERE	395,60	106,07	0,27	121,60	602,20
14004	EL BRAYA	215,78	107,29	0,50	34,20	503,51
14018	BOUFATIS	210,82	79,40	0,38	145,05	490,29
14012	MOSTAGANEM	375,00	109,13	0,29	154,00	588,20
14001	AN NESSISSA	244,21	81,86	0,33	102,00	442,01
14006	BORDJ BOU ARRIDIJ	365,32	83,01	0,23	231,10	493,00
11111	SIDI OLADAH	312,37	108,23	0,34	133,70	605,24
13203	OUED EL MA	323,77	119,28	0,37	135,90	770,50
13104	MEVAA	245,60	89,84	0,37	182,70	509,70
14001	FOUM EL GHERZA	122,98	67,47	0,55	40,70	395,70
14201	CHEFA	292,22	89,88	0,31	150,67	571,07
14001	AN DIASSER	281,25	89,48	0,32	112,49	403,98
14006	AN TAGOUT	321,06	109,48	0,33	165,10	472,80
14016	BATNA	365,92	103,34	0,28	153,13	692,50
14006	FOUM TOUB	456,26	138,47	0,30	203,80	771,00
14004	AN MILIOUN M.F	412,54	128,03	0,31	96,40	704,40
14002	EL ARGHA	205,70	44,94	0,22	148,80	404,65
14001	EL ACCEDI	214,48	37,07	0,17	85,20	432,40
14002	EL BAYADH	246,26	81,54	0,33	93,00	492,40
14001	MICHERIA	256,02	71,59	0,28	72,80	429,80
14104	NAAMA	224,25	79,14	0,35	49,70	459,40
14003	TABLAT	467,58	198,17	0,42	298,70	1334,15
14002	BEN ELHANE	388,69	110,23	0,28	184,70	652,40
14003	DIEBAHA	634,22	186,10	0,29	254,30	1380,10
14003	BOUHADDADA	786,85	227,29	0,29	340,40	1335,20
14003	TADREVAHE	370,23	98,10	0,27	151,20	602,40
14001	BOU MALEK	536,12	195,79	0,37	203,50	1257,30
11001	SID ALI BEN YOUS	384,22	115,77	0,30	79,60	660,20
11002	IMMOU YOUB	208,80	100,47	0,48	107,50	545,00
11111	DIEBEL KAROUS	288,75	71,96	0,25	172,50	483,20
11110	SAIDA	295,20	85,74	0,29	87,85	412,50
11119	BOUCHEHE	389,08	114,41	0,29	110,00	709,38
11141	TIZI	387,24	118,91	0,31	180,40	540,58
11103	BOU HANIFIA BGE	310,11	81,10	0,26	135,00	502,87
12801	TERESSA	344,15	114,53	0,33	155,60	624,00
12804	EL KOUF	277,08	81,19	0,30	90,70	509,00
14006	AN MARHOUF	372,49	143,37	0,39	110,45	844,26
14006	BOUGROUFP	551,21	140,18	0,25	279,20	884,00
14001	SOUR EL GHOZLANE	442,37	124,50	0,28	221,54	840,10
14004	EL ESSAM	328,24	113,87	0,32	128,90	720,70
14006	BOUCHA	402,84	93,69	0,24	202,20	622,72
14003	BOU BIREK	518,70	145,04	0,28	239,70	887,64
14003	BENT GLASSINE	309,28	105,28	0,34	121,40	544,80
14003	BENT BAREL BGE	477,94	147,22	0,31	179,60	761,19
14006	KHEMS OULD MOUSSA	490,53	179,91	0,37	114,40	919,90
14002	BENBERKANE	445,02	131,72	0,30	194,93	753,20
17002	CHEKEF	170,44	92,62	0,54	113,20	355,60
17008	DJELFA	247,52	110,24	0,45	49,30	600,00

Annexe 02 : Probabilité de succession de deux années sèches.

Stations Ouest		Stations centre		Stations Est	
Stations	Probabilité (%)	Stations	Probabilité (%)	Stations	Probabilité (%)
12605	8,96	10703	8,33	20809	5,71
12703	13,43	10704	11,11	30204	2,99
12804	8,96	10803	5,56	30205	2,99
13004	9,72	10901	9,72	30301	5,97
13404	8,96	11003	5,56	30302	8,96
40103	8,33	11004	11,27	30504	5,97
40104	9,72	11302	5,56	30906	4,48
40203	11,11	11404	4,17	30909	5,97
40301	15,28	11605	8,33	31302	7,46
40402	5,56	11803	11,11	31503	10,45
40405	5,56	12503	11,11	50905	8,33
40406	6,94	20205	9,72	51111	4,17
40415	11,11	20306	5,56	51203	9,72
40418	15,94	20312	11,11	61304	5,56
40502	12,5	20313	6,94	61601	6,94
40504	8,33	20315	6,94	62301	8,33
40518	4,17	20406	8,33	70201	5,56
40612	6,94	20509	6,94	70306	2,82
80102	6,94	20511	8,33	70316	8,33
80201	9,72	20601	6,94	70406	5,56
81202	13,89	20602	8,33	70704	5,56
81401	5,56	20607	8,33	100303	9,72
81404	7,35	21014	4,17	100401	8,33
110201	9,72	21017	2,78	120301	6,94
110802	6,94	21020	8,33	120504	6,94
111113	11,11	21115	5,56	140205	6,94
111130	12,86	21209	8,33	140505	4,17
111219	11,94	21403	9,72	150608	8,33
111413	8,96	21601	4,17		
111503	6,94	21705	9,72		
160303	13,89	21801	0		
160403	9,72	21903	1,39		
160406	11,11	22002	2,78		
160702	10,45	50101	5,56		
		90203	5,56		
		90302	6,94		
		90403	8,33		
		90503	6,94		
		150101	4,17		
		150204	9,72		
		150703	5,63		
		170102	18,31		
		170208	12,5		

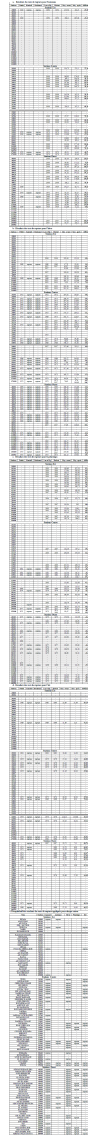
Annexe 03 : Position du Maximum.

Station:	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Bassins côtiers												
20286	2,74	5,59	15,07	17,81	19,18	6,85	8,22	10,96	9,59	0,00	0,00	0,00
20306	0,00	10,96	9,59	21,92	23,29	12,33	2,74	5,48	4,11	0,00	0,00	0,00
20312	0,00	13,7	15,07	26,03	24,66	9,59	2,74	5,48	2,74	0,00	0,00	0,00
20314	0,00	15,07	17,81	26,03	24,66	6,85	4,11	8,22	4,11	0,00	0,00	0,00
20318	0,00	9,59	15,07	21,92	26,03	8,22	4,11	5,48	5,48	0,00	0,00	0,00
20406	0,00	15,07	19,18	26,03	20,55	8,22	5,48	2,74	2,74	0,00	0,00	0,00
20509	1,37	6,85	17,81	26,03	21,92	8,22	6,85	5,48	2,74	0,00	0,00	0,00
20511	1,37	5,48	12,33	26,03	21,92	6,85	9,59	12,33	2,74	1,37	0,00	0,00
20601	1,37	5,48	12,33	26,03	21,92	6,85	9,59	12,33	2,74	1,37	0,00	0,00
20602	0,00	6,85	15,07	26,03	24,66	9,59	6,85	9,59	1,37	0,00	0,00	0,00
20607	0,00	6,85	15,07	26,03	24,66	9,59	6,85	9,59	1,37	0,00	0,00	0,00
20609	0,00	6,85	20,55	26,03	17,81	1,37	6,85	0,00	1,41	0,00	1,41	0,00
21014	0,00	5,48	9,59	19,18	26,03	17,81	12,33	5,48	9,59	0,00	0,00	0,00
21017	0,00	9,59	9,59	19,18	26,03	5,48	13,7	13,7	1,37	1,37	0,00	0,00
21020	0,00	4,11	10,96	17,81	21,92	8,22	10,96	15,07	1,37	0,00	0,00	0,00
21116	0,00	2,74	13,7	26,03	26,03	9,59	9,59	12,33	0,00	0,00	0,00	0,00
21209	0,00	12,33	13,7	22,59	26,03	4,11	4,11	8,22	4,11	0,00	0,00	0,00
21403	0,00	6,85	10,96	17,81	19,18	8,22	8,22	15,07	1,37	0,00	0,00	0,00
21601	0,00	4,11	16,44	26,03	20,55	9,59	6,85	9,59	2,74	0,00	0,00	0,00
21705	1,37	4,11	13,7	23,29	10,44	10,96	13,7	12,33	4,11	0,00	0,00	0,00
21801	0,00	5,48	12,33	17,81	19,18	9,59	10,96	12,33	2,74	0,00	0,00	0,00
21903	0,00	6,85	12,33	21,92	20,55	10,96	13,7	9,59	4,11	0,00	0,00	0,00
22002	0,00	8,22	17,81	21,92	13,7	12,33	6,85	6,85	2,74	0,00	0,00	0,00
20284	1,47	2,94	10,96	26,03	14,71	11,76	10,29	10,29	1,47	0,00	0,00	0,00
20288	0,00	2,94	8,22	26,03	14,71	11,76	8,22	14,71	2,94	0,00	0,00	0,00
20302	0,00	8,22	20,44	26,03	17,76	8,22	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20302	0,00	4,41	17,65	26,03	20,55	14,71	5,88	4,41	1,47	0,00	0,00	0,00
20354	1,47	2,94	23,29	26,03	17,65	8,22	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20355	0,00	2,94	16,18	26,03	24,47	12,34	5,88	2,94	1,47	0,00	0,00	0,00
20399	1,47	13,24	13,24	26,03	16,18	10,29	2,94	2,94	0,00	0,00	0,00	0,00
21002	0,00	4,41	23,29	26,03	17,65	14,71	2,94	2,94	1,47	0,00	0,00	0,00
21002	0,00	4,41	23,29	26,03	17,65	14,71	2,94	2,94	1,47	0,00	0,00	0,00
40103	0,00	8,22	5,48	13,7	26,03	12,33	15,07	9,59	13,7	0,00	0,00	0,00
40104	2,74	6,85	9,59	15,07	26,03	9,59	13,7	10,96	9,59	0,00	0,00	0,00
40202	0,00	8,22	9,59	24,66	19,18	12,33	9,59	8,22	9,59	0,00	0,00	0,00
40301	0,00	10,96	16,18	26,03	17,81	10,96	5,48	4,11	1,37	0,00	0,00	0,00
40402	1,37	8,22	16,44	23,29	23,29	13,7	8,22	2,74	2,74	0,00	0,00	0,00
40405	0,00	8,22	15,07	17,81	19,18	15,07	9,59	5,48	9,59	0,00	0,00	0,00
40406	0,00	9,59	9,59	23,29	20,55	17,81	9,59	4,11	5,48	0,00	0,00	0,00
40412	0,00	2,74	11,76	20,55	21,92	17,81	10,96	6,85	5,48	0,00	0,00	0,00
40418	1,43	10	12,86	14,29	18,57	14,29	7,14	11,43	10	0,00	0,00	0,00
40602	0,00	5,48	15,07	26,03	20,55	17,81	9,59	4,11	1,37	0,00	0,00	0,00
40604	1,37	5,48	12,33	23,29	23,29	10,96	10,96	4,11	8,22	0,00	0,00	0,00
40510	0,00	6,85	15,07	26,03	19,18	13,7	10,96	2,74	5,48	0,00	0,00	0,00
40612	0,00	10,96	20,55	23,29	13,7	10,96	9,59	5,48	6,85	0,00	0,00	0,00
60202	1,37	2,74	16,44	24,66	24,66	13,7	8,22	6,85	1,37	0,00	0,00	0,00
60302	2,74	6,85	8,22	20,55	23,29	10,96	8,22	12,33	5,48	0,00	0,00	1,37
60403	0,00	5,48	10,96	18,50	20,55	15,07	6,85	4,11	1,37	0,00	0,00	0,00
60500	0,00	5,48	6,85	26,03	17,81	12,33	6,85	9,59	4,11	0,00	0,00	0,00
180101	2,74	10,96	5,48	20,55	17,81	9,59	8,22	19,18	4,11	0,00	1,37	0,00
180204	2,74	5,48	10,96	20,55	16,44	8,22	4,48	6,85	8,22	0,00	0,00	0,00
180608	10,96	2,74	9,59	21,92	17,81	9,59	8,22	8,22	9,59	1,37	0,00	0,00
180703	0,00	2,74	5,48	26,03	20,83	15,44	11,11	6,84	2,78	0,00	0,00	0,00
Cheff												
10700	8,22	16,07	2,74	8,22	6,59	8,22	13,7	16,07	12,33	4,11	0,00	2,74
10704	15,07	13,7	4,11	5,48	12,33	2,74	8,22	2,74	26,03	2,74	1,37	1,37
10803	6,85	15,07	5,48	16,44	17,81	13,7	8,22	8,22	8,22	0,00	0,00	0,00
10901	1,37	10,96	9,59	20,55	10,96	10,96	13,7	13,7	8,22	1,37	0,00	0,00
11000	9,59	16,44	4,11	12,33	21,92	10,96	6,85	6,85	8,22	1,37	0,00	1,37
11004	0,00	11,11	8,33	15,5	27,78	11,11	20,83	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00
11302	1,37	13,7	12,33	19,18	21,92	9,59	16,44	4,11	1,37	0,00	0,00	0,00
11404	2,74	8,22	15,07	21,92	17,81	12,33	8,22	9,59	4,11	0,00	0,00	0,00
11604	1,37	9,59	16,44	26,03	10,96	12,33	8,22	12,33	0,00	0,00	0,00	0,00
11803	0,00	6,85	13,7	19,18	26,03	17,81	9,59	5,48	1,37	0,00	0,00	0,00
12400	1,37	5,48	6,85	17,81	26,03	8,22	13,7	10,96	6,85	0,00	0,00	0,00
12605	2,94	5,48	16,44	16,18	19,12	19,12	9,59	11,76	4,41	0,00	0,00	0,00
12700	0,00	11,76	8,22	16,18	22,06	10,29	13,24	13,24	4,41	0,00	0,00	0,00
12804	0,00	8,22	13,24	17,65	26,03	19,12	5,88	10,29	4,41	0,00	0,00	0,00
13004	1,37	13,7	13,7	19,18	9,59	13,7	9,59	8,22	9,59	1,37	0,00	0,00
13404	1,47	13,24	16,18	19,12	10,29	17,65	13,24	5,88	2,94	0,00	0,00	0,00
Hauts plateaux Est												
50103	17,81	16,44	4,11	4,11	16,44	10,96	10,96	12,33	2,74	0,00	1,37	0,00
50905	12,33	9,59	6,85	12,33	10,96	10,96	8,22	13,7	10,96	2,74	0,00	1,37
61111	15,07	12,33	9,59	15,07	13,7	9,59	4,11	4,11	16,44	0	0,00	0,00
61201	6,85	9,59	8,22	16,44	10,96	5,48	6,85	17,81	16,44	1,37	0,00	0,00
70202	12,33	8,22	4,11	16,44	6,85	5,48	5,48	16,44	17,81	1,37	4,11	0,00
70300	11,11	8,22	6,84	13,69	7,56	4,11	13,7	8,33	20,83	4,11	0,00	1,37
70310	12,33	5,48	10,96	13,69	7,56	5,48	8,22	16,44	10,96	6,85	0,00	0,00
70400	9,59	4,11	9,59	16,07	9,59	6,85	10,96	13,7	12,33	4,11	1,37	2,74
70704	6,85	5,48	12,33	10,97	2,74	6,85	12,33	17,81	10,29	5,48	1,37	1,37
106003	9,59	9,59	5,48	19,18	9,59	5,48	6,85	13,7	13,7	2,74	1,37	2,74
106001	5,48	4,11	12,33	21,92	24,66	13,7	6,85	8,22	1,37	0,00	1,37	0,00
110001	17,81	9,59	8,22	6,85	5,48	4,11	6,85	16,44	12,33	10,96	0,00	1,37
116004	16,44	5,48	12,33	12,33	5,48	6,85	6,85	13,7	13,7	4,11	0,00	2,74
140206	1,37	2,74	8,22	26,03	17,4	12,33	9,59	9,59	1,37	0,00	0,00	1,37
140208	2,74	5,48	15,07	26,03	21,92	16,44	8,22	2,74</				

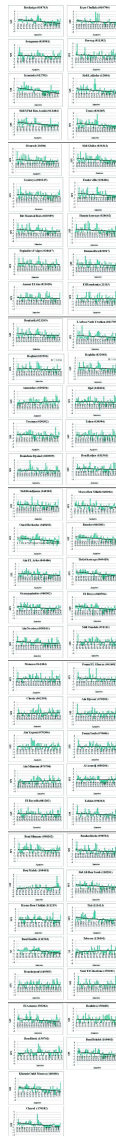
Stations	Perim	Kendall	Bainhand	Lee et Hg	Hubert	Moy. avant	Moy.apres	Difference
Stations est								
38809	1950	rupture	rupture	1950	1950	801,46	773,90	27,55
30204	-	-	-	2001	2001	569,88	543,55	26,33
30205	-	-	-	2001	-	-	-	-
30301	-	-	-	-	-	-	-	-
30302	1961	-	rupture	1961	1961	1317,07	1111,4	205,67
30904	-	-	-	2001	-	-	-	-
30906	-	-	-	2001	-	-	-	-
31302	-	-	-	2001	2001	640,85	793,81	152,96
31503	-	-	-	2001	-	-	-	-
60905	-	-	-	2001	2001	356,49	428,51	72,02
61111	-	-	-	2007	-	-	-	-
61203	-	-	-	2001	2001	309,49	460,87	151,38
61304	-	-	-	2007	-	-	-	-
61601	1969	-	rupture	1969	1969	147,97	101,19	46,78
61301	-	-	-	2007	-	-	-	-
70201	-	-	-	2001	-	-	-	-
70306	-	-	-	-	-	-	-	-
70316	-	-	-	-	-	-	-	-
70406	-	-	-	2007	-	-	-	-
70704	-	-	-	2001	2001	345,16	439,75	94,59
106303	1969	-	-	1969	1969	606,32	339,04	267,28
106401	-	-	-	2001	2001	509,84	749,67	239,83
120301	-	-	-	2001	2001	331,4	464,3	132,9
120504	-	-	-	2002	2002	269,53	361,48	91,95
140208	-	-	-	-	-	-	-	-
140403	-	-	-	2007	-	-	-	-
140408	-	-	-	1995	1995	418,39	338,71	79,68
Stations centre								
20208	1980	rupture	rupture	1980	1972	610,71	454,95	155,76
20306	rupture	rupture	rupture	1986	1986	690,32	570,92	119,4
20312	1980	rupture	rupture	1986	1984	618,81	464,07	154,74
20313	1975	rupture	rupture	1975	1975	687,14	542,4	144,74
20318	1980	-	rupture	1980	2004	601,7	699,62	97,92
20406	1986	rupture	rupture	1986	1986	616,12	411,01	205,11
20500	1980	rupture	rupture	1984	1980	800,26	676,76	123,5
20511	1984	rupture	rupture	1984	1984	699,47	556,08	143,39
20605	1975	rupture	rupture	1975	2007	-	-	-
20607	-	-	-	1975	1972	841,76	675,65	166,11
21014	1980	rupture	rupture	1986	1986	602,82	491,76	111,06
21017	-	-	-	-	-	-	-	-
21026	-	-	-	-	-	-	-	-
21115	-	-	-	-	-	-	-	-
21209	1986	rupture	rupture	1986	1986	691,8	548,72	143,08
21403	-	-	-	-	-	-	-	-
21601	-	-	-	2001	-	-	-	-
21705	-	-	-	1996	1975	1033,49	865,83	167,66
21801	-	-	-	-	-	-	-	-
21903	-	-	-	1975	1962	670,51	515,83	154,68
22002	1975	-	rupture	1975	-	857,48	715,57	141,91
10703	1976	rupture	rupture	1977	1977	311,02	209,54	101,48
10704	1977	rupture	rupture	1977	1977	379	196,86	182,14
10803	1979	rupture	rupture	1979	1979	411,67	310,66	101,01
10901	1945	rupture	rupture	1945	1947	466,86	299,4	167,46
11003	-	-	-	2007	-	-	-	-
11004	-	-	-	-	-	-	-	-
11302	-	-	-	-	-	-	-	-
11404	-	-	-	-	-	-	-	-
11605	-	-	-	2007	-	-	-	-
11803	1980	rupture	rupture	1980	1980	716,1	576,31	139,79
12503	1974	rupture	rupture	1979	1974	425,9	266,69	159,21
50101	1976	rupture	rupture	1976	1976	271,52	210,6	60,92
60203	1975	rupture	rupture	1975	1975	694,05	555,4	138,65
60306	-	-	-	2007	-	-	-	-
60403	1975	rupture	rupture	1975	1975	693,60	562,24	131,36
60503	-	-	-	-	-	-	-	-
140101	-	-	-	2001	2001	430,21	597,01	166,8
140204	1972	rupture	rupture	1972	1972	407,22	310,54	96,68
140703	-	-	-	2001	-	-	-	-
170102	1977	rupture	rupture	1977	1977	215,7	108,3	107,4
170208	1975	rupture	rupture	1975	2004	504,86	336,95	167,91
Stations ouest								
40103	1980	rupture	rupture	1980	1980	444,83	365,44	79,39
40104	1976	rupture	rupture	1950	1950	214,81	125,33	89,48
40203	1980	rupture	rupture	1980	1980	448,08	242,21	205,87
40301	1972	rupture	rupture	1972	1972	526,58	309,63	216,95
40402	1974	rupture	rupture	1974	1974	406,11	231,37	174,74
40405	1974	rupture	rupture	1974	1974	439,69	326,33	113,36
40406	1970	rupture	rupture	1970	1970	386,68	324,09	62,59
40415	1980	rupture	rupture	1986	1986	242,31	262,98	20,67
40418	1975	rupture	rupture	1975	1975	594,59	270,09	324,5
40502	1974	rupture	rupture	1974	1974	441,44	343,02	98,42
40504	1975	rupture	rupture	1975	1975	567,04	297,6	269,44
40518	1974	rupture	rupture	1974	1974	346,99	369,39	22,4
40612	-	-	-	-	-	-	-	-
12705	1979	rupture	rupture	1979	1979	416,81	237,66	179,15
12708	1978	rupture	rupture	1978	1978	508,74	388,51	120,23
13004	1978	rupture	rupture	1975	1975	372,87	263,59	109,28
13004	1976	rupture	rupture	1976	1976	403,6	281,52	122,08
13404	1980	rupture	rupture	1980	1980	283,67	213,91	69,76
80102	1975	rupture	rupture	1975	1975	347,53	199,47	148,06
80201	1976	-	-	2007	1976	235,36	184,04	51,32
81202	-	-	-	2007	2007	-	492,4	88,72
81401	-	-	-	2007	-	-	-	-
81404	-	-	-	-	-	-	-	-
110201	1975	rupture	rupture	1975	1975	430,11	309,68	120,43
110802	1964	rupture	rupture	1964	1964	276,25	247,75	28,5
111115	-	-	-	-	-	-	-	-
111219	-	-	-	-	-	-	-	-
111413	1974	rupture	rupture	1974	1974	446,24	329,79	116,45
111401	1976	rupture	rupture	1976	1976	338,35	248,28	90,07
111130	-	-	-	-	-	-	-	-
106303	1980	rupture	rupture	1980	1980	336,17	234,72	101,45
106403	1974	rupture	rupture	1974	1974	549,48	392,87	156,61
106406	1974	rupture	rupture	1974	1974	575,54	377,05	198,49
106408	-	-	-	2007	-	-	-	-
100702	1971	rupture	rupture	-	-	545,603	384,585	161,018

*Les valeurs en caractère gras indiquent une augmentation de la pluviométrie

Annexe 05 : Résultats des tests de rupture à l'échelle saisonnière.



Annexe 06 : Évolution de l'indice pluviométrique standardisé des stations de la zone d'étude.



Annexe 07 : Résultats des Chaines de Markov pour quatre saisons des trois périodes.

analyse du régime climatique au nord de l'algérie

Stations	Périodes	saisons	Ordre 0		Ordre1		Ordre2	
			P0	P1	P00	P11	P000	P111
Alger	1936-1975	1	0,84	0,16	0,91	0,51	0,91	0,54
	1936-1975	2	0,62	0,38	0,78	0,63	0,81	0,65
	1936-1975	3	0,67	0,33	0,80	0,58	0,81	0,56
	1936-1975	4	0,88	0,12	0,91	0,37	0,92	0,31
	1976-2001	1	0,84	0,16	0,88	0,41	0,89	0,46
	1976-2001	2	0,65	0,35	0,79	0,60	0,80	0,61
	1976-2001	3	0,69	0,31	0,81	0,59	0,83	0,56
	1976-2001	4	0,89	0,11	0,93	0,39	0,94	0,42
	2002-2008	1	0,83	0,17	0,87	0,38	0,88	0,32
	2002-2008	2	0,58	0,42	0,76	0,67	0,78	0,65
	2002-2008	3	0,68	0,33	0,81	0,59	0,81	0,58
	2002-2008	4	0,90	0,11	0,92	0,34	0,93	0,29
Annaba	1936-1975	1	0,81	0,19	0,87	0,48	0,89	0,50
	1936-1975	2	0,57	0,43	0,72	0,63	0,75	0,63
	1936-1975	3	0,65	0,35	0,79	0,60	0,80	0,58
	1936-1975	4	0,88	0,12	0,92	0,37	0,92	0,38
	1976-2001	1	0,80	0,20	0,87	0,49	0,88	0,51
	1976-2001	2	0,56	0,44	0,73	0,66	0,74	0,65
	1976-2001	3	0,63	0,37	0,77	0,61	0,79	0,59
	1976-2001	4	0,86	0,14	0,91	0,43	0,92	0,41
	2002-2008	1	0,80	0,20	0,87	0,50	0,88	0,46
	2002-2008	2	0,54	0,46	0,72	0,67	0,74	0,67
	2002-2008	3	0,59	0,41	0,75	0,64	0,77	0,62
	2002-2008	4	0,88	0,12	0,93	0,46	0,92	0,43
Constantine	1936-1975	1	0,80	0,20	0,86	0,43	0,87	0,51
	1936-1975	2	0,63	0,38	0,76	0,59	0,77	0,60
	1936-1975	3	0,66	0,35	0,77	0,56	0,78	0,52
	1936-1975	4	0,85	0,15	0,89	0,38	0,90	0,38
	1976-2001	1	0,81	0,19	0,866	0,421	0,878	0,412
	1976-2001	2	0,65	0,35	0,78	0,59	0,80	0,59
	1976-2001	3	0,66	0,34	0,78	0,57	0,78	0,55
	1976-2001	4	0,84	0,16	0,89	0,39	0,90	0,40
	2002-2008	1	0,84	0,17	0,86	0,32	0,87	0,31
	2002-2008	2	0,61	0,39	0,77	0,64	0,78	0,65
	2002-2008	3	0,65	0,35	0,80	0,63	0,80	0,64
	2002-2008	4	0,87	0,13	0,91	0,39	0,91	0,40
Chleff	1936-1975	1	0,88	0,12	0,93	0,46	0,93	0,49
	1936-1975	2	0,69	0,31	0,81	0,58	0,83	0,57
	1936-1975	3	0,71	0,29	0,83	0,58	0,84	0,56
	1936-1975	4	0,90	0,10	0,93	0,35	0,94	0,35
	1976-2001	1	0,89	0,11	0,93	0,38	0,94	0,36
	1976-2001	2	0,72	0,28	0,82	0,54	0,84	0,50
	1976-2001	3	0,75	0,25	0,85	0,56	0,86	0,53
	1976-2001	4	0,92	0,09	0,94	0,37	0,95	0,42
	2002-2008	1	0,89	0,11	0,91	0,30	0,92	0,21
	2002-2008	2	0,65	0,35	0,79	0,62	0,82	0,63
	2002-2008	3	0,71	0,29	0,83	0,56	0,83	0,52
	2002-2008	4	0,92	0,09	0,94	0,38	0,95	0,46
Oran	1936-1975	1	0,89	0,11	0,93	0,43	0,93	0,43
	1936-1975	2	0,71	0,29	0,82	0,56	0,84	0,55
	1936-1975	3	0,73	0,27	0,84	0,55	0,86	0,52
	1936-1975	4	0,91	0,09	0,94	0,39	0,95	0,31
	1976-2001	1	0,88	0,12	0,92	0,40	0,93	0,38
	1976-2001	2	0,74	0,26	0,83	0,52	0,84	0,47
	1976-2001	3	0,77	0,23	0,87	0,57	0,88	0,52
	1976-2001	4	0,90	0,10	0,93	0,37	0,94	0,39
	2002-2008	1	0,89	0,11	0,92	0,37	0,93	0,25
	2002-2008	2	0,71	0,29	0,84	0,60	0,85	0,63
2002-2008	3	0,75	0,25	0,83	0,49	0,85	0,51	
2002-2008	4	0,92	0,08	0,95	0,37	0,95	0,33	