

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0003-16

APA Citation ( APA توثيق ):

Azzaz Rahmani, Fatma Zohra (2016). Régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale[Thèse de magister, ENSH].

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

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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

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

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

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

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

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE LHYDRAULIQUE  
ARBAOUI ABDELLAH

N° d'ordre : .....

Série : .....

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

OPTION : **GENIE DE L'EAU**

Présenté par :

**AZZAZ RAHMANI Fatma Zohra**

**Thème**

**Régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale.**

**Devant le jury composé de :**

Président :	Mr B.SALAH	Professeur	ENSH Blida
Rapporteur :	Mr M.MEDDI	Professeur	ENSH Blida
Examineur :	Mr B.REMINI	Professeur	Université Blida
Examineur :	Mr B. BENLAOUKLI	Maitre de Conférences (A)	ENSH Blida
Examineur :	Me H. MEDDI	Maitre de Conférences (A)	ENSH Blida

Année universitaire : 2015/2016

## REMERCIEMENTS

Je remercie « Allah » de m'avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce travail d'initiation à la recherche

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur, monsieur MEDDI Mohamed, professeur à l'ENSH, pour m'avoir encadré, je lui exprime ma reconnaissance pour ses précieux conseils qui m'ont guidé dans la réalisation de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur SALAH Boualem pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je tien également à remercier les membres de jury, Monsieur REMINI Boualem de l'Université de Blida, Monsieur BENLAOUKLI Bachir de l'ENSH – Blida et Madame MEDDI Hind de l'ENSH – Blida pour le temps consacré à l'évaluation du présent document et d'avoir fait un long voyage pour assister à la soutenance, je lui exprime ma gratitude.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance.

*Fatima Zohra*

## *Dedicaces*

Je dédie ce travail

- ❖ A mes parents qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire par leur encouragement et leur soutien moral, que dieu leur accorde la santé et le bonheur
  
- ❖ A mes sœurs
  
- ❖ A mes frères
  
- ❖ A mes amis

*Fatima Zohra*



## ملخص

الجفاف هو و كارثة طبيعية معقدة تقترح عدة مشكلات ملكتها الكتلبة راء العالم ، له اثار اجتماعية ، بيئية واقتصادية خطيرة . نظرا لأضرارها ، اصبحت دراسة الجفاف هدفا لعدة باحثين . الآن منتهي بين الظواهر الجوية التي تهيمن بعقدها نابعها ذا العمل الذي يركع لزي تحديد الأنماط الإقليمية للجفاف في شرق الجزائر على أساس البيانات السنوية لهطول الأمطار في الفترة الممتدة من 1970-2009 مجلة في كل من 32 تظم على منطقة الدراسة . محط تحديد المناطق متجانسة من حيث جفاف هو شرط مسبق ، بحيث يمكن دراسة خصائص الجفاف في كل من هذه المناطق هذه الدراسة ، تم استخدام مؤشر التباين الأمطار السنوي لتحديد الفترات الجافة والرطبة لتحديد المناطق الجافة . تم تطبيق التحليل عنصري الرئيسي على المتوسط مؤشر التساقط السنوي .

**الكلمات الدالة :** الجفاف ، مؤشر التساقط ، التحليل عنصري الرئيسي ، الجهوية ، الشرق الجزائري .

## Résumé

Les sécheresses sont des aléas naturels complexes qui posent problème dans plusieurs régions du monde chaque année, avec de graves conséquences sociales, environnementales et économiques. vu leur nocivité, l'étude de la sécheresse a été curieusement la cible de plusieurs travaux de recherche. Actuellement elle est parmi les phénomènes météorologiques extrêmes que l'on comprend le moins en pratique pour cela , notre travail portera sur l'identification des schémas régionaux de la sécheresse en Algérie orientale en se basant sur les données de précipitations annuelles entre 1970 et 2009, pour 32 pluviomètres répartis uniformément sur la zone d'étude.

L'identification des régions homogènes en termes de sécheresse est un préalable, de sorte que les caractéristiques de la sécheresse puissent être étudiées à l'intérieur de chacune de ces régions. Dans la présente étude, on utilise l'indice de précipitation normalisé (SPI) appliqué sur les précipitations annuelles pour déterminer les périodes sèches et humides et pour étudier la régionalisation de la sécheresse en appliquant l'analyse en composantes principales (ACP) sur les moyennes du SPI annuel.

**Mots clés :** sécheresse, SPI, ACP, régionalisation, Algérie orientale.

## Summary

Droughts are complex natural hazards that cause problems in many parts of the world every year, with serious social, environmental and économiques.vu its harmfulness, the study of the drought has been curiously the target of several research. Now she is among the extreme weather phenomenon that we understand the least in practice for this, our work will focus on the identification of regional patterns of drought in eastern Algeria on the basis of annual precipitation data from 1970 to 2009, for 32 rain gauges distributed uniformly over the study area.

The identification of homogeneous regions in terms of dryness is a prerequisite, so that the of characteristics drought can be studied within each of these regions. In this study, standardized precipitation index is used (SPI) on annual rainfall applied to determine dry and wet periods and to study the regionalization of drought we apply the principal components analysis (PCA) on the of average Annual SPI.

**Keywords:** drought, SPI, PCA, regionalization, eastern Algeria.

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Effet de serre	7
<b>Figure I.2</b> : Schémas des différents types de la sécheresse et de leurs impacts	11
<b>Figure II.3</b> : Carte de la zone d'étude	34
<b>Figure II.4</b> : Carte de la situation géographique	35
<b>Figure II.5</b> : Carte du bassin hydrographique	40
<b>Figure II.6</b> : Carte géologique de l'Est algérien	42
<b>Figure II.7</b> : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien	45
<b>Figure III.8</b> : Situation géographique des postes pluviométriques de la zone d'étude	48
<b>Figure III.9</b> : Régression linéaire (exemple Régression de st 030104 par st 030301)	52
<b>Figure V.10</b> : Evolution du SPI-12 sur la période d'étude de chacune des stations étudiées	67
<b>Figure V. 11</b> : Histogramme des classes humides du SPI-12 pour chaque station durant la période d'étude	75
<b>Figure V.12</b> : Histogramme des classes sèches du SPI-12 pour chaque station durant la période d'étude	76
<b>Figure V.13</b> : Histogramme de la somme des classes humides et sèches du SPI pour chaque station durant la période d'étude	77
<b>Figure V. 14</b> : Pourcentage de stations indiquant des valeurs du SPI-12 $\leq (-1)$ et $\geq (1)$ .	78
<b>Figure V.15</b> : Répartition géographique des classes SPI-12.	82
<b>Figure V.16</b> : Pourcentage de stations indiquant des valeurs du SPI-03 $\leq (-1)$ et $\geq (1)$ .	86
<b>Figure V.17</b> : Graphique des valeurs propres des stations.	88
<b>Figure V. 18</b> : Projection sur la première composante principale	91
<b>Figure V. 19</b> : Projection sur la deuxième composante principale	91
<b>Figure V.20</b> : Projection des variables sur les plans (C1xC2)	92
<b>Figure V.21</b> : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)	93
<b>Figure V.22</b> : Distribution des années sur les deux axes	95

Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Avantages et inconvénients des indicateurs météorologiques	23
<b>Tableau I.2 :</b> Avantages et inconvénients des indicateurs hydrologiques	24
<b>Tableau I.3 :</b> Seuils des classes pour quelques indicateurs de sécheresses et leurs désignations	26
<b>Tableau II.4 :</b> Superficie des bassins hydrographiques	39
<b>Tableau III.5 :</b> Caractéristiques géographiques des stations pluviométriques de la zone d'étude	49
<b>Tableau III.6 :</b> Stations choisies pour l'analyse et taux des lacunes	50
<b>Tableau III.7:</b> Résultats des tests	58
<b>Tableau IV.8 :</b> Interprétation du SPI par rapport à leur valeur et leur probabilité au non-dépassement selon Mckee (1993)	62
<b>Tableau V.9 :</b> Répartition du SPI-12	71
<b>Tableau V.10 :</b> Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI-12) pour chaque station durant de la période d'étude	73
<b>Tableau V.11:</b> Années sèches et humides dans la zone d'étude	81
<b>Tableau V.12:</b> Pourcentage de la variance après rotation Varimax	87
<b>Tableau V.13:</b> Projection des variables sur les principaux axes	89

## Liste des annexes

**Annexe III.1** : Régression des stations

**Annexe V.2** : Calcul du SPI annuel pour chaque station

**Annexe V.3** : Calcul du SPI-03 pour chaque station

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

## Table des matières

**Introduction générale** 1

### Chapitre I : étude bibliographique

#### Introduction

1. Le climat et les changements climatiques	5
1.1. L'effet de serre (terminologie associée aux changements climatiques)	6
1.2. Les effets du changement climatique	7
2. La sécheresse	8
2.1. Définition de la sécheresse	8
2.2. Les différents types de sécheresses	9
2.2.1. La sécheresse météorologique	10
2.2.2. La sécheresse agricole	10
2.2.3. La sécheresse hydrologique	10
2.2.4. La sécheresse socioéconomique	10
2.3. La relation entre les différents types de sécheresse	12
2.4. Les impacts et les risques de la sécheresse	12
2.4.1. Impacts économiques	13
2.4.2. Impacts sociaux	13
2.4.3. Impacts environnementaux	14
2.5. L'indicateur de la sécheresse	14
2.5.1. Les indicateurs météorologiques	14

2.5.1.1. Indice de pourcentage à la normale (PN)	14
2.5.1.2. Indice des déciles de précipitation (DI)	15
2.5.1.3. Indice de l'écart à la moyenne (Em)	15
2.5.1.4. Indice de pluviosité (Ip)	16
2.5.1.5. Rapport à la normale des précipitations (RN)	16
2.5.1.6. Indice standardisé de précipitation (SPI)	17
2.5.2. Les indicateurs agricoles	17
2.5.2.1. Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer	17
2.5.2.2. L'indice du stress hydrique des cultures (Jackson, 1982) ou (CWSI)	17
2.5.2.3. Indice de déficit climatique IDC	18
2.5.3. Les indicateurs hydrologiques	18
2.5.3.1. Indice de sécheresse de Keetch Byram (KBDI)	18
2.5.3.2. Indice de sécheresse de Palmer (PDSI)	19
2.5.3.3. Indice CMI	21
2.5.3.4. Indice SWSI	22
2.6. Les avantages, les inconvénients et les échelles de ces indices	23
2.7. Les seuils des classes pour quelques indicateurs de sécheresse	26
2.8. Les études réalisées sur la sécheresse dans le monde et en Algérie	26

## Conclusion

## Chapitre II : présentation de la zone d'étude

### Introduction

1. Situation géographique	34
2. Relief	35
3. Hydrographique	39
4. Géologie	41
5. Hydrogéologie	43
6. Climat de la région	43
6.1. Précipitations	44

### Conclusion

## Chapitre III : collecte des données pluviométriques

### Introduction

1. Choix des stations pluviométriques à étudier	47
2. Méthodes de comblement de lacunes	51
3. Vérification des hypothèses de base	54
3.1. Test de l'indépendance	54
3.2. Test de stationnarité	55
3.3. Test de l'homogénéité	56

### Conclusion

## Chapitre IV : méthodes utilisées

### Introduction

1. Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	60
1.1. Définition de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	60
1.2. Interprétation du SPI	61
1.3. Avantages et inconvénients de la méthode	62
2. Analyse en composantes principales (ACP)	63
2.1. Principe de la méthode	63
2.2. Description de la méthode	64
2.3. Nombre d'axes à retenir	65
2.4. A.P.C sans rotation	66
2.5. A.C.P avec rotation	66

### Conclusion

## Chapitre V : résultats et discussions

### Introduction

1. Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	67
1.1. Répartition temporelle des épisodes secs et humides sur la période étudiée	68
1.1.1. Classe humide	74
1.1.2. Classe sèche	75
1.1.3. Classes humides et sèches	77



1.2. Répartition temporelle et spatiale des périodes humides et sèches	79
1.2.1. Années représentant l'absence de la sécheresse sur la totalité de la zone d'étude	79
1.2.2. Années représentant la rareté de la sécheresse sur la totalité de la zone d'étude.	80
1.2.3. Années de la sécheresse persistante sur la totalité de la zone d'étude.	80
1.3. Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-3	86
2. Analyse en composantes principales	87
2.1. Interprétation des résultats de l'A.C.P	87
2.2. Projection des variables sur les axes factoriels	88
2.2.1. Projection des variables sur la première composante C1	90
2.2.2. Projection des variables sur la deuxième composante C2	90
2.3. Interprétation des résultats sur les individus (années)	94
<b>Conclusion</b>	
<b>Conclusion générale</b>	97
<b>Références bibliographiques</b>	99
<b>Annexes</b>	

## INTRODUCTION GENERALE

La sécheresse est un phénomène normal et récurrent du climat. Elle diffère des autres catastrophes par le fait qu'elle s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années. Elle affecte des espaces assez larges. Cependant, ses caractéristiques varient d'une région à une autre.

La sécheresse est parmi les catastrophes naturelles les plus complexes et son début et sa fin ainsi que sa sévérité sont souvent difficiles à déterminer. Comme pour les autres catastrophes, les impacts de la sécheresse touchent différents secteurs ; économiques, sociaux et environnementaux.

Dans le monde, les régions les plus touchées par la sécheresse se situent dans l'Amérique du nord (sud-ouest des États-Unis et le Mexique), l'Amérique du sud (Brésil et l'Argentine), le sud-est de l'Asie (la Chine et l'Inde) et l'Afrique. Ces trente dernières années, certains pays ont connu des millions de morts causées par de grandes famines accompagnées d'épidémies, de maladies à transmission hydrique dues au manque d'accès à l'eau propre. Ces sécheresses ont aussi accentué les effets de la désertification, ce qui nuit gravement au patrimoine agricole.

Dans les pays de l'Afrique, une sécheresse exceptionnelle a frappé la région du Sahel, et a commencé vers la fin des années 60 et a duré plusieurs décennies, soit : jusqu'aux années 80. Cette sécheresse a été classée comme exceptionnelle de par sa durée. Elle a entraîné des milliers de morts. L'activité agricole a aussi enregistré de grosses pertes et des difficultés de relève ; 80% du bétail a été décimé sous l'effet du manque d'eau et de nourriture, et la sécheresse de 1986 à 1973 a provoqué une perte de 600 000 tonnes sur la récolte des céréales.

En Afrique de l'Australe, l'agriculture est la principale activité économique. Plus de 60% des revenus des pays de la région proviennent de l'agriculture le pourcentage s'élève à 75%, compte non tenu de l'Afrique du Sud. C'est donc une région essentiellement agricole et la survenue d'une sécheresse affecte gravement son économie.

Pour les pays du nord et du Maghreb, ils ont connu durant la période 1975-2000, une succession de périodes de sécheresses intenses et persistantes. Celles-ci ont particulièrement touché les pays de l'Afrique de Nord, avec des conséquences dramatiques et des déséquilibres importants des ressources en eau aussi bien quantitativement que qualitativement. (Meddi, 2009; Ellouze, 2008; Sebbar et al. 2011; Achite et al. 2012)

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

Le Maroc a connu plusieurs sécheresses de différentes durées, intensités et étendues spatiales. Leur fréquence est irrégulière et aucune organisation n'a été notée. Durant le 20<sup>ème</sup> siècle, le pays a connu plus de dix périodes sèches principales dont l'étendue s'est presque généralisée sur la majeure partie du pays et est d'une intensité modérée à forte. Celles-ci ont survécu au cours des années 1905, 1917-20, 1930-35, 1944-45, 1948-50, 1961, 1975, 1981-1984, 1991-93, 1995 et 1999-2001. Cependant, les plus sévères sont celles de 1905, 1931-34, 1944-45, 1982-84, 1995 et 1999-2000. L'année 1995 est la plus sèche du siècle.

La Tunisie a connu plusieurs grandes sécheresses. Mais ces dernières ne se sont pas produites au cours de toutes les décennies avec la même fréquence. Les années des décennies 1950 et 1970, par exemple, se démarquent par une faible apparition des années sèches. En revanche, les années 1920, 1940, 1960 et 1980 ont connu des sécheresses pluriannuelles, de grandes extensions spatiales et avec un déficit

pluviométrique important (Henia, 2001). La sécheresse des années 1940 est la plus sévère du siècle.

En Algérie, c'est surtout sur le plan hydrologique que la sécheresse est appréhendée, en raison de l'extrême sensibilité des ressources en eaux superficielles aux variations climatiques. Au cours du siècle précédent, l'Algérie a vécu plusieurs périodes de sécheresse dont les plus intenses ont été ressenties en 1910 et en 1940 et de manière plus persistante dans les années 1975-80 ainsi qu'au début du siècle.

La dernière sécheresse sévit ainsi dans le pays depuis déjà deux décennies, et est particulièrement sévère dans l'ouest du pays. Une étude sur l'aménagement hydroagricol de la Mitidja confirme que la période 1950-75 a été plus humide que la moyenne à long terme ; alors qu'à partir de 1977, on assiste à une sécheresse assez marquée, sans précédent depuis le début des observations. Ainsi, depuis plusieurs années, la pluie est devenue un facteur important de la vie quotidienne du citoyen. Les restrictions en eau, devenues courantes en été, se sont étendues ces dernières années à plusieurs régions en période d'hiver.

Dans notre travail, qui se décline sous cinq chapitres, nous avons étudié la sécheresse en Algérie orientale.

Dans le premier chapitre, nous présenterons un aperçu bibliographique sur la sécheresse, en citant quelques études réalisées dans ce domaine et les indicateurs les plus couramment utilisés pour le suivi de la sécheresse.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons la zone d'étude et ses caractéristiques : géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques.

Dans le troisième chapitre, nous ferons une présentation des données pluviométriques ainsi que des méthodes utilisées pour le comblement des données pluviométriques et l'homogénéisation de ces données.

Dans le quatrième, nous ferons une présentation de deux méthodologies utilisées dans notre travail : l'indice de précipitation standardisé (SPI) et l'analyse en composantes principales (ACP).

Dans le dernier chapitre, nous ferons l'interprétation les différents résultats de notre travail et nous étudierons la régionalisation de la sécheresse dans la zone d'étude.

## Introduction

La présente étude bibliographique a pour objet la présentation des études portant sur la sécheresse et qui ont été réalisées dans le monde et en l'Algérie. Nous commençons d'abord par une définition du climat et des changements climatiques ainsi des effets du réchauffement climatique sur l'homme et l'environnement, ensuite la définition de la sécheresse et les relations entre ses différents types, puis nous citerons les indicateurs et les indices les plus couramment utilisés par les chercheurs. Enfin, nous présenterons quelques études réalisées dans le monde et en Algérie.

### 1. Le climat et les changements climatiques

Le climat désigne les valeurs moyennes des paramètres météorologiques (précipitations, températures...,etc.) , mesurées sur de longues périodes et des secteurs géographiques vastes et bien définis. Trente années (30) d'observations sont nécessaires pour définir des caractéristiques d'ordre climatique.

La détermination du climat est effectuée à l'aide de moyenne établie à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, précipitation, ensoleillement, humidité et vitesse du vent. Leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels sont également pris en compte.

Le climat est sujet à plusieurs changements, et ce, de façon naturelle. L'activité volcanique et les variations du rayonnement solaire sont des causes naturelles et connues concourants aux variations climatiques. Malgré cela, il est peu probable que le réchauffement climatique du siècle dernier soit d'origine naturelle. En effet l'augmentation de l'activité humaine a de fortes répercussions sur le bilan radioactif de l'atmosphère. Les émissions de gaz à effet de serre provenant de différentes sources, tant naturelles qu'industrielles, participent aux changements dans la composition de l'atmosphère, affectant ainsi ses interactions avec les différents types de radiations (solaires, terrestres, etc.). (GIEC, 2007)

### 1.1. L'effet de serre (terminologie associée aux changements climatiques)

Présents dans l'atmosphère, certains gaz retiennent une part de l'énergie solaire renvoyée vers l'espace par la Terre, sous forme de rayons infrarouges. Ils maintiennent ainsi la température sur Terre à une moyenne d'environ 15°C. Sans eux, cette moyenne descendrait à -18° C, interdisant, de ce fait, le développement de la vie.

Ces gaz à effet de serre(GES) peuvent être présents naturellement dans l'atmosphère, comme le gaz carbonique(CO<sub>2</sub>), le méthane(CH<sub>4</sub>) ou la vapeur d'eau(H<sub>2</sub>O). Cette dernière est le gaz à effet de serre le plus abondant et occupe une fourchette comprise entre 0,4 et 4% du volume atmosphérique. Tous les autres GES occupent moins de 0,1% de ce volume.

Depuis la révolution industrielle, du XVIII<sup>e</sup> siècle, les activités humaines ont fait augmenté la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à l'image : du gaz carbonique, issu de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon...,etc.); du méthane, provenant plutôt des activités agricoles; du protoxyde d'azote, émis par certains engrais ou par certains procédés chimiques ; des gaz fluorés provenant des climatiseurs, etc.

Cette augmentation des gaz à effet de serre épaissit la couche de gaz qui, par conséquence, capte plus de radiations, élevant ainsi la température globale à la surface de la Terre. Les scientifiques ont remarqué une augmentation de la température globale de 0,6 °C au cours du siècle dernier. Cette variation de la température, qui est très rapide, comparativement aux changements déjà survenus sur la terre de façon naturelle, entraîne **un réchauffement planétaire**. (ADEME, 2015).



La vie grâce à l'effet de serre.



S'il n'y avait pas d'effet de serre.



Un risque de déséquilibre.

**Figure I.1** : Effet de serre (source ADEME, 2015)

### 1.2. Les effets du changement climatique

Le réchauffement climatique a des conséquences très préoccupantes pour l'homme et son environnement : (Tazdait, 2012).

- Perturbation, voire destruction de certains écosystèmes ;
- Extinction d'espèces ;
- Extension du désert ;
- Recrudescence de maladies infectieuses, qui s'étendront vers le nord ;
- Vagues des chaleurs plus intenses ;
- Réchauffement des terres émergées et des latitudes élevées ;



- Fonte des glaciers, diminution, voire disparition dans la zone de glace ; dans l'Arctique et l'Antarctique.
- Elévation du niveau de la mer provoquant les inondations de la zone côtière, à cause de l'augmentation de la température de l'eau : en se dilatant, l'eau chaude, devient plus volumineuse que l'eau froide.
- Baisse de la ressource en eau potable ;
- Fortes pluies plus fréquentes et plus denses ;
- Déplacement des populations dû à l'élévation du niveau des mers (risques accrus d'inondations).
- Développement des maladies.
- Difficultés à se procurer de l'eau et de la nourriture à cause de l'augmentation de la sécheresse.
- Augmentation des catastrophes naturelles (cyclones, sécheresse, inondations...,etc.).

## 2. La sécheresse

### 2.1. Définition de la sécheresse

Un phénomène extrême résulte de ces changements climatiques qu'est la sécheresse, un phénomène qui se reproduit plus fréquemment ces dernières années et qui provoque des conséquences aussi désastreuses qu'une inondation.

La sécheresse n'a pas de définition universelle (OSS, 2009). La sécheresse se distingue des phénomènes naturels par l'absence d'une définition précise et incontestée (OMM, 2006). Pour expliquer ce phénomène, nous citons quelques définitions :

La sécheresse est une absence prolongée ou une insuffisance marquée des précipitations, une insuffisance des précipitations, entraînant une pénurie d'eau pour certaines activités ou certains groupes ou une période de temps anormalement sèche et

suffisamment longue pour que le manque de précipitations cause un déséquilibre hydrologique sérieux (GIEC, 2007).

La sécheresse est un phénomène naturel dû à un déficit des précipitations, qui fait que les quantités d'eau sont insuffisantes pour certaines activités ou certains groupes. L'absence de précipitations pendant une période prolongée, généralement une saison ou plus, peut s'aggraver. Du point de vue hydrologique, l'insuffisance prolongée des précipitations entraîne une diminution correspondante du débit des cours d'eau des zones arides, du ruissellement des eaux et de l'humidité du sol (UNCCD, 2000).

La sécheresse est un minimum hydrologique extrême résultant de perturbations du cycle hydrologique d'une durée suffisamment longue pour qu'il en résulte un important déficit en eau ; les ressources en eau locales deviennent insuffisantes pour soutenir les activités établies ou normales dans la région (OMM, 1994).

La sécheresse peut être définie comme étant une période prolongée de précipitations insuffisantes, normalement une ou plusieurs saisons, voire des années, qui causent un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays. Cette sécheresse doit être considérée par rapport à certaines conditions de moyen à long terme du bilan final des précipitations et de l'évapotranspiration dans une région particulière, l'échelle temporelle et l'efficacité des précipitations (OSS, 2009).

D'après ces définitions, on peut conclure que la sécheresse est une période déficitaire en précipitation sur une certaine durée et qui touche une région donnée de l'espace. Celle-ci peut subsister quelques mois ou même un bon nombre d'années.

## **2.2. Les différents types de sécheresses**

Selon les définitions opérationnelles il existe quatre types de sécheresse, météorologique, agricole, hydrologique et socio-économique.

### **2.2.1. La sécheresse météorologique**

On en mesure l'intensité en comparant la quantité des précipitations reçues par rapport à la quantité normale des précipitations. Pour évaluer une telle sécheresse, il faut tenir compte de facteurs comme la quantité totale des précipitations reçues pendant une période donnée (semaine, mois, année), le temps écoulé entre les pluies substantielles et l'époque à laquelle elles sont tombées (OMM, 2006).

### **2.2.2. La sécheresse agricole**

Causée par la sécheresse météorologique, elle s'aggrave avec les pertes dues à l'évapotranspiration. La jachère diminue la gravité d'une sécheresse agricole en maintenant dans le sol l'humidité emmagasinée l'année précédente. Une sécheresse météorologique ne provoque pas forcément une sécheresse agricole, et cela dans les régions où l'eau d'irrigation reste accessible et les réserves d'eau abondantes (OMM, 2006).

### **2.2.3. La sécheresse hydrologique**

Elle correspond à une diminution des réserves d'eau dans les cours d'eau, les réservoirs de surface et la nappe phréatique. La sécheresse hydrologique est causée par un manque de précipitations accompagné d'une évaporation massive. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet (OMM, 2006).

### **2.2.4. La sécheresse socioéconomique**

On parle de sécheresse socioéconomique lorsque l'insuffisance de l'eau commence à affecter les gens et leurs vies (OSS, 2009). Elle diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (i.e. grains, fourrage, énergie hydro-électrique...,etc.) qui sont tributaires des précipitations (OMM,2006).

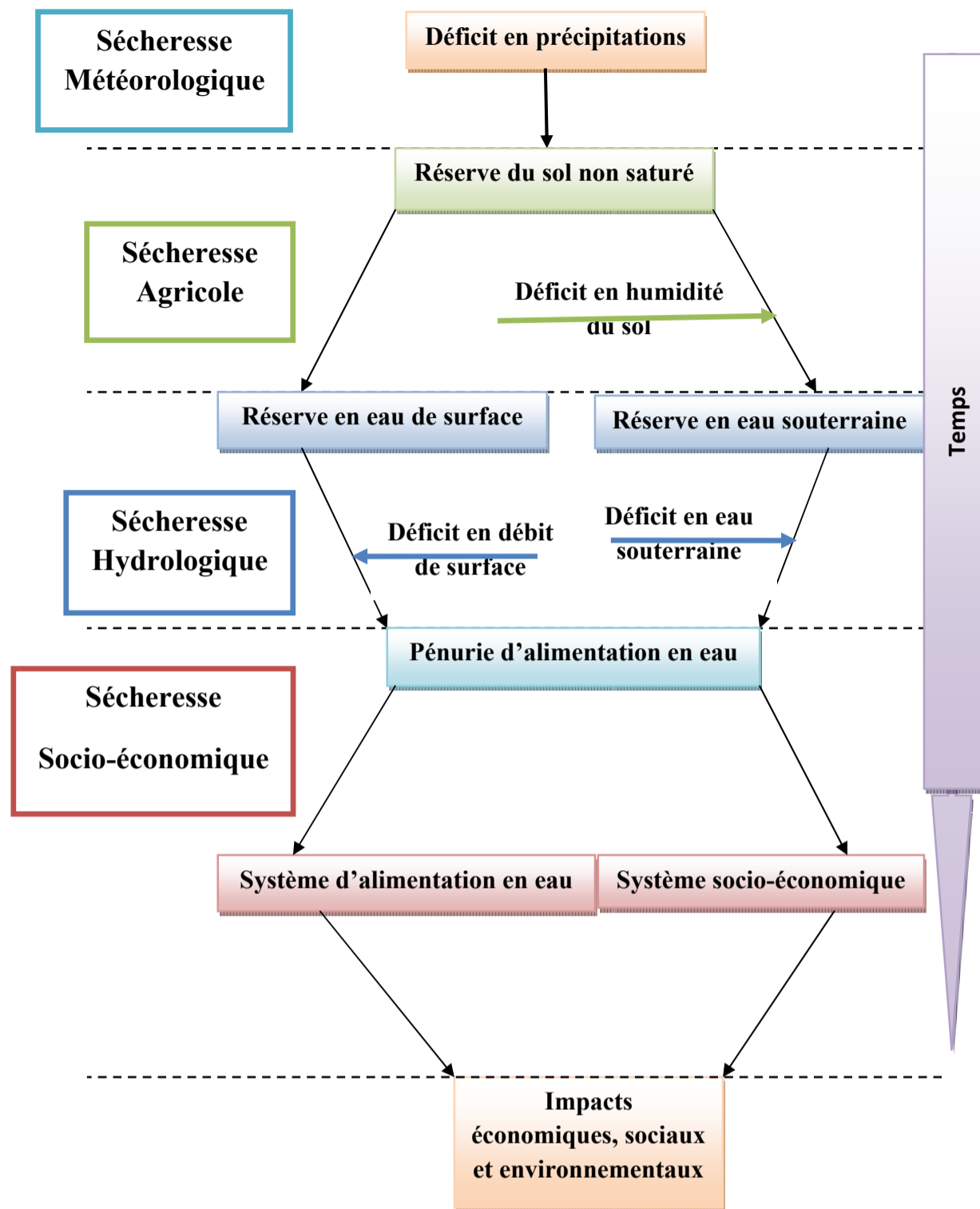


Figure I.2: Schémas des différents types de la sécheresse et de leurs impacts

### 2.3. La relation entre les différents types de sécheresse

Les relations entre ces différents types de sécheresse sont illustrées à la figure 02, or lorsqu'il y a un déficit pluviométrique (sécheresse météorologique), la sécheresse agricole est la première en pâtir sentie, le secteur agricole étant le premier à être affecté du fait de sa dépendance directe de l'humidité du sol, facilement épuisable. Il faut cependant et souvent plusieurs semaines de déficit avant que les cultures et les pâturages n'en soient atteints. La persistance d'un temps sec pendant plusieurs mois entraîne une diminution de débit des cours d'eau, une baisse du niveau des réservoirs et des lacs et, éventuellement, un abaissement de la nappe phréatique. Et si la sécheresse se maintient encore, les effets de la sécheresse socio-économique se font sentir. Ces effets continuent d'augmenter avec le temps dans la mesure où la sécheresse participe aussi à l'augmentation de la demande en eau, dont l'offre est justement contrainte par cette même sécheresse. Ainsi, il paraît évident que les différentes sécheresses interagissent les unes avec les autres, et que dans cette interaction, le facteur temps est déterminant (NDMC, 2008).

### 2.4. Les impacts et les risques de la sècheresse

L'extension spatiale de la sécheresse est généralement plus importante que celle des autres risques naturels et ses impacts sont non structuraux et difficiles à quantifier (Ellouza et Abida, 2008).

En période de sécheresse, la demande en eau tend à augmenter et l'approvisionnement hydrique pour divers usages (domestiques, agricoles, industriels...,etc.) se pose en termes de quantité et de qualité. En exerçant des contraintes sur l'approvisionnement en eau, la sécheresse affecte nos vies et notre santé, dégrade notre environnement et porte préjudice à notre économie.

#### 2.4.1. Impacts économiques

- Une moindre production dans les secteurs de l'agriculture, foresterie, pêche, énergie hydroélectrique, tourisme, industrie, et activités financières qui en dépendent.
- Chômage causé par la baisse de production.
- Economie pénalisée due à une navigabilité moindre des cours d'eau, fleuves et canaux.
- Secteur touristique pénalisé en raison de la moindre disponibilité de l'alimentation en eau et/ou des masses d'eau.
- Pression sur les institutions financières (risques accrus lors des prêts, baisse de capitaux, etc.).
- Réduction des recettes pour les compagnies des eaux en raison de livraisons réduites en eau.
- Coûts des mesures d'urgence pour améliorer les ressources et diminuer les demandes (coûts additionnels pour le transport et la conduite des eaux, coûts de publicité pour réduire l'utilisation d'eau, etc.).

#### 2.4.2. Impacts sociaux

- Dommages portés à la santé et sécurité publiques, en affectant la qualité de l'air et de l'eau ou par une augmentation des incendies.
- Accroissement des inégalités sociales, affectant différents groupes socio-économiques et tensions entre les administrations publiques et les groupes affectés.
- Changements des perspectives politiques.
- Désagréments résultant du rationnement d'eau.
- Impacts sur le mode de vie (chômage, moindre capacité d'épargne, difficultés des soins personnels, réutilisation de l'eau dans les ménages, interdiction de laver les trottoirs et les voitures, incertitude quant à l'avenir, réduction des occasions festives et des distractions, perte de propriété).
- répartition non équitable des impacts de la sécheresse et des mesures d'atténuation. Abandon d'activités et émigration (dans les cas extrêmes).

### 2.4.3. Impacts environnementaux

- Réduire l'alimentation en eau et la qualité des eaux de surface et souterraines.
- Dommages aux écosystèmes et zones humides, biodiversité et maladies (érosion du sol, poussière, couvert végétal réduit, etc.).
- Augmentation des incendies.
- Manque d'aliments bétail et d'eau pour boire.
- Augmentation de la concentration saline (dans les cours d'eau, nappes souterraines, zones irriguées).
- Pertes dans les lacs naturels et artificiels (poissons, paysages, etc.).
- Dommages portés à la vie sauvage dans les cours d'eau et les zones humides (flore, faune).
- Altération de la qualité de l'air (par exemple poussière polluante).

### 2.5. L'indicateur de la sécheresse

La sécheresse est un phénomène complexe. Elle touche tous les milieux où l'eau transite. De ce fait, les indices de suivi de la sécheresse sont très variés, mais étant donné que le premier maillon de la sécheresse se situe au niveau de la pluie, la plupart des indices sont fondés sur le paramètre pluviométrique. Beaucoup d'indices intègrent également au même titre que la pluie d'autres paramètres : climatiques (température, évapotranspiration), hydrologiques ou bioclimatiques. Nous allons les résumer de façon générale comme suit :

#### 2.5.1. Les indicateurs météorologiques

##### 2.5.1.1. Indice de pourcentage à la normale (PN)

Le rapport à la normale des précipitations représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année. (OSS, 2008).

$$PN = (P/P_m) * 100 \quad (I-1)$$

Où :

P : précipitation totale d'une période (mm).

P<sub>m</sub> : précipitation moyenne historique d'une période (mm).

### 2.5.1.2. Indice des déciles de précipitation (DI)

Ou bien en anglais «The decile index»; cette notion a été développée par Gibbs et Maher en 1967 pour palier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps. (OSS, 2008).

### 2.5.1.3. Indice de l'écart à la moyenne (Em)

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la médiane est le plus utilisé par les agro météorologues. Bien évidemment, quand l'échantillon de données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la médiane est grande. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P<sub>i</sub>) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (P<sub>m</sub>).

$$Em = P_i - P_m \quad (I-2)$$

L'écart est positif pour l'année humide, et négatif pour les années sèches. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne, et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée. Cet indice permet de visualiser et de déterminer le nombre d'années déficitaires et leur succession. (Jouilil, 2013).



#### 2.5.1.4. Indice de pluviosité (Ip)

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

$$I_p = P_i/P_m \quad (I-3)$$

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

$$I_{pm} = I_p - 1 \quad (I-4)$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche », dans le cas contraire. Lorsque la hauteur moyenne annuelle présentée est calculée sur une période assez longue, et que la distribution n'est pas très loin de la loi normale on peut utiliser le rapport à la normale au lieu de la moyenne. (Khaldi, 2005).

#### 2.5.1.5. Rapport à la normale des précipitations (RN)

Cet indice est exprimé mathématiquement en pourcentage comme suit :

$$RN\% = (P_i/P_m) * 100 \quad (I-5)$$

P<sub>i</sub> est la précipitation de l'année i et P<sub>m</sub> est la précipitation moyenne pour la même période de temps étudiée.

Ce rapport permet une estimation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale : une année est classifiée comme sèche si la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque le RN est inférieur à 100 %.

Cependant, cet indice ne permet pas de faire la comparaison entre différentes régions. En outre, il ne peut pas identifier l'impact spécifique de la sécheresse ou le facteur d'inhibition pour les plans d'atténuation des risques de sécheresse. (OSS,2013).

### 2.5.1.6. Indice standardisé de précipitation (SPI)

Le SPI a été développé par McKee et al., en 1993. C'est un indicateur statistique utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Basé sur un historique de précipitations de longue durée, le SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cette période varie généralement de 3 mois à 2 ans, selon le type de sécheresse que l'on désire suivre. (OSS, 2008).

$$SPI_i = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (I-6)$$

Où:

SPI i : indice standardisé de précipitation de l'année ;

Pi : hauteur de pluie précipitée au cours de l'année ;

Pm : moyenne interannuelle des hauteurs de pluie sur la période observée ;

$\sigma$  : écart de la pluie moyenne interannuelle ;

## 2.5.2. Les indicateurs agricoles

### 2.5.2.1. Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDS)

Cet indice utilise le principe du bilan du sol et intègre donc, en plus des précipitations, l'évapotranspiration et l'humidité du sol. Très utilisé aux USA, il permet de rendre également compte des sécheresses agricoles. Cependant, il est complexe à calculer, et peu adapté pour les régions à forte variabilité climatique.

### 2.5.2.2. L'indice du stress hydrique des cultures (Jackson, 1982) ou CWSI

C'est l'équivalent du CWSI pour les régions partiellement couvertes de végétation, car la température de surface et la température du couvert végétal sont équivalentes dans une région de forte densité végétale. Il est par définition le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle. Il peut être aussi

calculé en utilisant des mesures de réflectance et de la température de surface en plus de quelques données météorologiques simples.

$$CWSI = (1 - ETR / ETP) \quad (I-7)$$

### 2.5.2.3. Indice de déficit climatique (IDC)

$$IDC = (P - ETP) / ETP * 100 \quad (I-8)$$

Où P est la précipitation et ETP l'évapotranspiration potentielle de la période considérée (Aghrab, 2003). Une variante de cette variable est l'indice de stress hydrique climatique en utilisant la même formule, mais en remplaçant l'ETP par l'ETM qui est l'évapotranspiration maximale. (OSS, 2006).

## 2.5.3. Les indicateurs hydrologiques

### 2.5.3.1. Indice de sécheresse de Keetch Byram (KBDI)

Créé par John Keetch et George Byram en 1968 pour le Forest Service du Département de l'Agriculture des États-Unis, cet indice fournit une mesure quotidienne de la sécheresse du sol donnant une indication du stress hydrique des plantes. Le KBDI représente l'effet net des précipitations et l'évapotranspiration dans la production de déficit cumulé de l'humidité dans les couches de sol d'humus ou supérieure profondes. Le KBDI dispose d'une gamme allant de 0 (sol à la capacité au champ) à 2000 (sécheresse extrême) et représente la quantité de pluie nécessaire pour amener le sol à saturation. L'échelle 0-2000 du point est divisée en trois classes de sécheresse : 0-999 = faible; 1000-1499 = modéré, 1500-2000 = élevé. Simple à calculer, le KBDI utilise uniquement, des observations météorologiques quotidiennes. (OSS, 2013).

$$KBDI = \frac{[203.2 - Q] \cdot [(0.968 \exp(0.0875T + 1.5552) - 8.3) dt \cdot 10^{-3}]}{1 + 10.88 \exp(-0.001736R)} \quad (I-9)$$

Où :

Q (mm): déficit en humidité du sol

T (°C): température maximale journalière

R (mm): précipitation moyenne annuelle

dt (j): temps à partir duquel le sol perd son humidité

### 2.5.3.2. Indice de sécheresse de Palmer (PDSI)

Appelé aussi indice de sévérité de la sécheresse de Palmer, il mesure la sécheresse fondée sur les précipitations et les températures récentes. Il fut développé par le météorologue Wayne Palmer en 1965. L'indice de sécheresse de Palmer est fondé sur un modèle de l'offre et de la demande de l'humidité du sol. Si l'offre est directement calculée, la demande est plus complexe à établir puisqu'elle dépend de plusieurs facteurs, comme la température et l'humidité du sol mais aussi de facteurs plus difficiles à calibrer comme les taux d'évapotranspiration et le taux de recharge. Palmer a tenté de pallier à ces difficultés en développant un algorithme qui les approxime en se fondant sur les données facilement disponibles: températures et précipitations. Malgré la difficulté de son calcul, cet indice s'est révélé efficace pour déterminer la sécheresse de longue durée (à l'échelle des mois) mais il ne l'est pas autant dans des cas où il s'agit d'une question de semaines. On utilise le 0 comme moyenne, et l'état de sécheresse est représenté par des valeurs négatives; par exemple, moins 2 signifie sécheresse modérée, moins 3 signifie sécheresse sévère, et moins 4 signifie sécheresse extrême. L'algorithme de Palmer peut donc être appliqué pour n'importe quel site du moment que les données relatives aux précipitations et aux températures sont disponibles. (OSS,2013).

$$PDSI = X (i) = 0.897X (i-1) + Z (i)/3 \quad (I-10)$$

Où:

$i$  : mois de l'année ;

$X(i-1)$  : PDSI de la période précédente ;

$Z(i)$  : indice de correction de l'humidité ;

Et :

$$Z(i) = K (P - Pc) \quad (I-11)$$

Où:

$K$  : facteur de poids, ajusté régional ;

$P$  : précipitation mensuelle réelle (mm) ;

$Pc$  : précipitation mensuelle appropriée aux conditions climatiques existantes) ;

Et :

$$Pc = \alpha_j * PE + \beta_j * PR + \gamma_j * PRO - \delta_j * PL \text{ (mm)} \quad (I-12)$$

Où:

$j$  : mois de l'année

$PE$  : évapotranspiration potentielle (mm)

$PR$  : recharge potentielle du sol (mm)

$PRO$ : ruissellement potentiel (mm)

$PL$  : perte potentielle dans le sol (mm)

$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$  : coefficients climatiques mensuels. (Moyennes historiques des ratios des valeurs mensuelles attendues par rapport aux valeurs potentielles).

### 2.5.3.3. Indice CMI (Crop Moisture Index)

C'est un indicateur météorologique qui donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité. Développé à partir des procédures du PDSI en 1968, cet indice définit les sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration.

$$CMI = EAI + WI \quad (I-13)$$

Où :

WI : indice de recharge du sol par les précipitations (mm)

EAI « Evapotranspiration Anomaly Index »

Et :

$$EAI = 0.67 * Y_{i-1} + 1.8 \frac{ET - ETc}{\sqrt{\alpha}} \quad (I-14)$$

Où :

$Y_{i-1}$  : CMI de la semaine précédente

ET : évapotranspiration (mm)

ETc : évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent (mm)

$\alpha$  : coefficient d'évapotranspiration

Cet indice utilise la température moyenne et les précipitations totales hebdomadaires comme intrants, en plus de la valeur du CMI de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles. Le cumul des CMI des semaines précédentes engendre donc une erreur cumulative dans le calcul du CMI de la semaine. (OSS, 2008).

#### 2.5.3.4. Indice SWSI (Surface Water Supply Index)

Créé par Shafer et Dezman en 1982, cet indicateur est un complément au PDSI qui incorpore des éléments d'hydrologie et de climatologie. C'est aussi un indicateur normalisé qui permet de comparer différentes régions, pour des périodes mensuelles en particulier. Le SWSI a été spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il incorpore la couverture neigeuse, les précipitations en montagne, les cours d'eau, le contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Cet indicateur n'est cependant pas conçu pour de grandes variations topographiques.

Le SWSI est simple à calculer et donne une mesure de l'approvisionnement en eau superficielle. Par contre, un réarrangement des stations amène à refaire les distributions de fréquence de chaque station et un changement dans l'exploitation du bassin signifie le développement d'un nouvel algorithme. Il est donc difficile de maintenir une série temporelle de cet indice. (OSS,2013).

$$SWSI = \frac{a + PN_{si} + b + PN_{pcp} + c.PN_{rs} - 50}{12} \quad (I-15)$$

Où :

a, b, c : sont les poids associés à chaque composante : (a+b+c=1)

NP<sub>sp</sub> : couverture neigeuse équivalente en eau (mm)

NP<sub>pcp</sub> : précipitation (mm)

PN<sub>rs</sub> : réservoir (mm)

PN : probabilité de ne pas excéder (%).

## 2.6. Les avantages, les inconvénients et les échelles de ces indices

Les inconvénients et les avantages se résument dans les tableaux suivants:

**Tableau I.1** : Avantages et inconvénients des indicateurs météorologiques

Indices	Échelles		Avantages	Inconvénients
	Temporelles	Spatiales		
<b>PN</b>	Mensuelles, Saisonniers, Annuelles	Locales, Régionales.	- simple méthode ; - très efficace pour une région et une saison.	- comparaison difficile de la moyenne ou médiane régionale. - mal interprété
<b>D</b>	Mensuelles, Saisonniers, Annuelles.	Locales, Régionales	- simple méthode ; - peut remplacer en cas de difficulté le pourcentage à la normale - moins de supposition	-nécessite une série de données climatiques suffisantes
<b>SPI</b>	Mensuelles, Saisonniers, Annuelles.	Locales, Régionales	-contrôle périodique de la sécheresse ; - permet de surveiller les séquences sèches et humides ; - gestion possible des ressources hydriques	- l'ajustement des données pluviométriques à la loi normale.



Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des indicateurs hydrologiques

Indices	Échelles		Avantages	Inconvénients
	Temporelles	Spatiales		
<b>KBDI</b>	Journalière	Locales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- évaluateur des déficits hydriques et de l'humus dans le sol</li> <li>- surveillance des feux de forêts</li> <li>- mesure journalière</li> <li>- fiable dans le monde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-des couches des sols limitées</li> <li>-pluviométrie moyenne régionale</li> <li>- utilisation des tables</li> <li>- point initial de calcul</li> </ul>
<b>PDSI</b>	Hebdomadaires, -Mensuelles	Régionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mesure de l'humidité du sol</li> <li>- indique le début, la durée et l'intensité de la sécheresse</li> <li>- bon contrôleur des longues périodes humides et sèches</li> <li>-indépendant dans l'utilisation de l'eau, ces facteurs sont-ils aussi utilisés</li> <li>- simplification des paramètres sol</li> <li>- indice pour la description des écoulements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-influencé par l'humidité du sol et type de sol</li> <li>- choix de l'estimation de l'évapotranspiration</li> </ul>

Tableau I.2 (suite) : Avantages et inconvénients des Indicateurs hydrologiques

Indices	Échelles		Avantages	Inconvénients
	Temporelles	Spatiales		
<b>CMI</b>	Hebdomadaires.	Régionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>-évaluation de l'humidité à court terme</li> <li>- indiquer la variation du climat</li> <li>- donner les seuils de comparaison entre les régions</li> <li>- définir la sécheresse par le déficit climatique</li> <li>-possible initialisation de mesures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-mauvaise surveillance de l'humidité à long terme</li> <li>- enchaîne des CMI successifs</li> </ul>
<b>SWSI</b>	Mensuelles	Régionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>-complète les indices de Plamer</li> <li>- comparaison régionale valable</li> <li>- calculs informatisables</li> <li>- caractérise chaque région</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-dépend des composantes hydrologiques et météorologiques</li> <li>- sensible aux nouvelles données</li> </ul>

### 2.7. Les seuils des classes pour quelques indicateurs de sécheresse

Nous citons dans le tableau suivant les classes qualificatives des conditions de sécheresses pour quelques indices les plus utilisés dans le monde.

**Tableau I.3 :** Seuils des classes pour quelques indicateurs de sécheresses et leurs désignations

Désignation	Les seuils minimaux et maximaux de chaque classe				
	D (20%)	SPI	PDSI	CMI	SWSI
<b>Très humide</b>	Déciles 9 ; 10	> 2	> 4,00	> 3,00	3,0 ; 4,0
<b>Humide</b>	Déciles 9 ; 10	1,5 ; 1,99	3,00 ; 3,99	2,0 ; 2,9	2,0 ; 2,9
<b>Modérément humide</b>	Déciles 7 ; 8	1,0 ; 1,49	0,50 ; 2,99	0,9 ; 1,9	0,9 ; 1,9
<b>Normale</b>	Déciles 5 ; 6	-0,99 ; 0,99	0,49 ; -0,49	-0,9 ; 0,9	-0,9 ; 0,9
<b>Modérément sec</b>	Déciles 3 ; 4	-1,0 ; -1,99	-0,50 ; -2,99	-1,0 ; -1,9	-1,0 ; -1,9
<b>Sec</b>	Déciles 1 ; 2	-1,5 ; -1,99	-3,00 ; -3,99	-2,0 ; -2,9	-2,0 ; -2,9
<b>Très sec</b>	Déciles 1 ; 2	< -2,0	< -4,00	< -3,00	3,0 ; -4,0

### 2.8. Quelques études réalisées sur la sécheresse dans le monde et en Algérie

La sécheresse préoccupe, en tout temps dans le monde et en Algérie, beaucoup de chercheurs et décideurs concernés par la gestion de cette problématique. Cette préoccupation a produit diverses visions, méthodes et expériences pour la lutte contre cette menace du bien-être et la sécurité alimentaire des humains. Dans ce contexte, on cite à titre d'exemple, quelques études réalisées sur la sécheresse en Algérie et dans le monde

## ❖ EN ALGERIE

- **KETTAB A. et al., 2004.** Les auteurs ont étudié le phénomène de la sécheresse dans les régions littorales de l'Algérie. Par l'intermédiaire de 08 stations météorologiques (Ghazaouat, Oran, Arzew, Alger, Chlef, Skikda, Annaba et El kala) qui couvrent 48 ans d'observations pluviométriques annuelles et mensuelles (de 1954 à 2001). Les méthodes utilisées sont les estimations par le modèle Jack Nife et par Bootstrap. L'utilisation de ces simulations a permis d'illustrer clairement l'information chronologique des pluies à l'échelle temporelle et font distinguer deux périodes ; la période humide qui s'étale de 1954 à 1986 et la période sèche qui correspond à la dernière décennie (1990-2000). Selon ces deux méthodes, le déficit pluviométrique est bien remarqué à l'Ouest (notamment à Oran, Ghazaouet et Arzew), les régions du Centre et de l'Ouest ont vu un déficit pluviométrique supérieur à 50% et à l'Est il était de 30%, durant la période (1987-2001).
- **AISSAT D., 2006.** L'auteur a étudié deux phénomènes climatiques ; les crues et les sécheresses à différentes échelles de temps dans la région du Moyen Cheliff. À partir de 24 postes, et des observations allant de 1968 à 2001, la sélection de la période est faite sur la même période concomitante avec les séries des débits. Ainsi, les différentes lacunes mensuelles et annuelles ont été comblées à base de régressions multiples entre les postes voisins, qui présentent des coefficients de corrélations significatives. La visualisation graphique de l'évolution des apports annuels de la station Pontéba sur l'oued Chélif et de la pluviométrie annuelle à la station Chlef ANRH sur une période allant de 1973 à 2001 montre clairement une irrégularité interannuelle importante en plus d'une décroissance continue depuis plusieurs années.
- **BOUCIFIANE A., 2006.** Ce travail a été réalisé par l'auteur dans le but d'appréhender le rôle du relief dans la répartition spatiale des précipitations, par l'approche pluviométrie/relief (l'altitude, l'altitude lissée, l'exposition, les effets de site, la distance à la mer) à l'échelle d'une unité hydrographique

(bassin Chélif-Zahrez), afin procurer le manque de l'insuffisance du réseau de mesure et mettre des relations liant le paramètre pluies aux facteurs relatifs de la situation géographique. Ce travail a montré un changement du régime pluviométrique à partir des années soixante dix ainsi que l'apparition d'un déficit pluviométrique jusqu'à la décennie 1980/90, ce phénomène explique la persistance de la sécheresse.

- **MEDDI H. et al., 2007.** L'étude faite par les auteurs concerne le Nord-Ouest de l'Algérie. La méthode utilisée est le modèle numérique PLUVIA, qui permet l'établissement de la carte de la répartition spatiale de la pluviométrie à l'échelle mensuelle. Cette technique a permis de tracer les cartes pluviométriques des mois de janvier, mars et novembre en fonction de la topographie. L'avantage de cette méthode montre l'influence des paramètres topographiques sur la distribution spatiale des pluies à l'échelle régionale et locale. Les résultats obtenus montrent que, les pluies mensuelles augmentent du sud au nord et de l'ouest à l'est. La partie littorale et les sommets qui lui sont proches reçoivent les pluies les plus importantes et les régions intérieures reçoivent moins de pluies du fait de l'appauvrissement des masses nuageuses de leurs humidités au fur et à mesure qu'elles se dirigent vers l'intérieur.
- **ACHITE M. et TOUAIBIA B., 2007.** Les auteurs ont examiné les crues et les déficits pluviométriques au niveau du bassin versant de l'oued Mina, par la méthode de l'analyse en composantes principale (A.C.P) qui sert à optimiser les données pluviométriques annuelles et reconstituer les séries hydrologiques, sur une période d'étude de 30 ans (allant 1970/71 à 1999/00). Les résultats ainsi obtenus sur le comportement de la pluie moyenne sur la première composante principale mettent en évidence une période excédentaire allant de 1970/71 à 1980/81, puis une période déficitaire de 1981/82.

- **MEDDI H. Et MEDDI M., 2007.** Les auteurs ont étudié la variabilité des précipitations à différentes échelles temporelles pour déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique. A l'aide des tests statistiques (test de Pettit, la statistique de Lee Héghinian et la segmentation de Hubert) et par l'intermédiaire de dix stations pluviométriques du Nord-Ouest algérien est établie une typologie des sécheresses par la méthode exprimant le déficit pluviométrique en pourcentage de la moyenne annuelle. Les résultats montrent des irrégularités spatiales des précipitations, une rupture dans la décennie 70 pour la quasi-totalité des postes étudiés et des réductions de la pluviométrie lorsque l'on se rapproche des régions arides. Aussi, l'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude, la diminution de la latitude et l'atténuation de cet accroissement par l'altitude.
- **MEDDI H et al., 2009.** Les auteurs ont étudié la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par l'utilisation des chaînes de Markov (1930-2003) à l'échelle saisonnière. Les auteurs ont constaté qu'il existe une forte tendance pour avoir une année sèche après une année considérée comme sèche au niveau des plaines de l'ouest ainsi qu'au niveau de celles du Centre du pays, soit deux années sèches qui se suivent.
- **ACHITE M et al., 2011.** Pour une caractérisation spatio-temporelle de la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Sly, situé dans une région semi-aride de Nord-Ouest de l'Algérie, les auteurs ont utilisé l'Indice Standardisé des Précipitations calculé pour des cumuls mensuels, recueillis dans 7 stations météorologiques, sur la période de mesure allant de 1970 à 2009. Achite et al. (2011) ont constaté que le bassin versant de l'oued Sly avait été touché par des sécheresses très sévères pendant les années 1981/1982, 1989/1990, 1999/2000, et 2006/2007. Ils ont constaté également que le sud du bassin était exposé à des sécheresses plus sévères et plus longues que le Centre et le Nord.

**Dans le Monde**

❖ **AU CANADA**

- **RICHARDS W. et BURRIDJ E., 2006.** Pour la caractérisation des sécheresses, qui ont sévi au Canada entre 1900 et 2004, les auteurs ont opté pour l'Indice Standardisé des Précipitations calculé à l'aide d'un algorithme acquis pour différentes échelles de temps (1, 2, 3, 6, 9, 12 et 24 mois). Les résultats obtenus ont permis aux auteurs d'avancer qu'une sécheresse unique en son genre a sévi au Canada en 2001 et ils ont caractérisé sa sévérité, sa durée et son extension.

❖ **AU MEXIQUE**

- **MANUAL REYES-GOMEZ V. et al., 2006.** Ces auteurs ont étudié la sécheresse hydrologique dans le bassin versant du Rio Chonchos, qui contient trois barrages (Boquilla, Las Virgenes et El Granero). Il se situe au Nord du Mexique et occupe une superficie de 64000 Km<sup>2</sup>. En comparant les résultats obtenus du SPI de douze séries de précipitations mensuelles, provenant de 32 stations avec des mesures allant de 1970 à 2004, et les débits des apports annuelles historiques en eau de l'ensemble des barrages durant la période 1993 à 2004.

❖ **EN TURQUIE**

- **YILDIZ O., 2009.** Par l'application de l'indice standardisé des précipitations dans le bassin versant du barrage Hirfanli, situé dans une région semi-aride en Turquie, l'auteur a pu déterminer la sévérité, l'extension géographique et les périodes éventuelles de retour des sécheresses dans ce bassin versant.

❖ **EN INDE**

- **PANDAY R.P. et al. 2010.** L'analyse des données de précipitations annuelles et saisonnières pour la période allant de 1901-2007, a révélé que le bassin de Sonar en Inde a subi des conditions de sécheresse avec une fréquence moyenne de retour d'une fois tous les 5 ans. Les auteurs ont estimé un déficit pluviométrique annuel de -35% et -43% pour les années 2006 et 2007, avec des

valeurs respectivement du SPI de -1,14 et -1,24. De ce fait, PANDAY et al., ont tenté de présenter une méthode pour la représentation spatiale de la vulnérabilité à la sécheresse en utilisant différents indicateurs qui sont, les caractéristiques topographiques, les différents types de sol et leur utilisation, la disponibilité relative de l'eau de surface et souterraine, la demande en eau et la déviation des précipitations par rapport à leur moyenne sur la période d'étude. Les informations données par ces indicateurs sont groupées en sous-classes et utilisées par un système d'information géographique pour créer des cartes de vulnérabilité à la sécheresse dans l'ensemble de bassin.

❖ **EN POLOGNE**

- **LABEDZKI L., 2007.** Pour estimer la fréquence des sécheresses météorologiques dans la partie centrale de la Pologne, des valeurs du SPI sont calculées, pour des échelles de temps de 3, 6, 12, 24 et 48 mois, sur une chronique de précipitations allant de 1861 à 2005. L'article présente les caractéristiques détaillées des sécheresses météorologiques et agricoles des années 1991–2005. L'auteur a constaté également que l'analyse de la sécheresse météorologique et agricole de l'année 2000 montre qu'un indice SPI de 1 ou 3 mois reflète mieux le développement de la sécheresse agricole qu'un indice SPI de 6 mois.

❖ **EN Espagne**

- **BEAUDIN I., 2006.** Cet auteur étudié la sécheresse entre 1989 à 1994 par l'intermédiaire de deux indicateurs satellitaires, du capteur AVHRR du satellite NOAA 11, l'indice de la condition de la végétation (VCI) et de l'indice de la condition thermique (TCI). Ces indices permettent la caractérisation des situations de sécheresse calculées pour des aires de 11 km<sup>2</sup>. Les résultats ont été comparés à l'un des indicateurs de sécheresse météorologique tel que le SPI qui a été retenu après un test local par rapport au pourcentage à la normale (PN) et à des échelles de temps variables (1, 2, 3, 6, 9 mois) provenant de 11 stations. Ces dernières possèdent une série temporelle de données de température et de pluviométrie de plus de 30 ans en Andalousie. L'analyse de la relation entre le



VCI, le TCI et le SPI a montré une bonne corrélation entre eux en période de sécheresse et semblent supporter l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour le suivi des sécheresses en milieu méditerranéen, plus particulièrement en Andalousie qui souffre beaucoup des sécheresses répétées.

❖ **EN TUNISIE**

- **ELLOUZE M. et ABID H., 2008.** Pour analyser la dépendance entre les séries de précipitations annuelles et mensuelles, enregistrées au Sud de la Tunisie, les principales caractéristiques des épisodes secs, durant la période comprise entre 1898 et 2003 ont été utilisées. Les auteurs ont basé leur étude sur les valeurs de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI), calculé pour le court, le moyen et le long terme (respectivement 3, 12 et 24 mois). Les résultats obtenus montrent une grande variabilité des valeurs du SPI pour le court terme avec des épisodes de sécheresse caractérisés par une grande fréquence et une courte durée. Cependant, pour les deux autres échelles de temps, les valeurs se stabilisent et révèlent des séquences sèches moins fréquentes mais plus prolongées. La période de sécheresse la plus importante en intensité, durée et extension est apparue surtout à la fin de l'année 1976.

❖ **AU MAROC**

- **SEBBAR A et al., 2011.** Sebbar et al., ont tenté d'étudier l'évolution récente du régime pluviométrique entre 1935 et 2004 et d'évaluer son impact sur l'extension spatio-temporelle de la sécheresse au Maroc septentrional. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé, en premier lieu, des tests statistiques pour détecter d'éventuelles ruptures dans le régime pluviométrique, et par la suite et dans le but de diagnostiquer les années sèches et humides, ils ont appliqué l'Indice Pluviométrique Standardisé (SPI). Par l'application des tests statistiques de détection de ruptures, les auteurs ont conclu que la période de rupture se situe entre 1968 et 1984. Et en analysant les valeurs de l'Indice Pluviométrique Standardisé, ils ont constaté l'installation d'une phase déficitaire avant 1956.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques études réalisées sur la sécheresse. À travers ces travaux, tout le monde s'accorde à dire que la sécheresse est une menace majeure pour la ressource en eau et ses fréquences de répétitions ces dernières années font craindre le pire.

Au niveau mondial, le problème de la sécheresse fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et l'état d'alerte a été donné pour essayer de trouver un remède à ce problème qui menace tout le globe terrestre. Au niveau national, les études sur la sécheresse existent, mais seulement dans l'ouest Algérien. Ainsi, les méthodes utilisées se concentrent uniquement sur la distribution temporelle ou la distribution spatiale des précipitations. Pour cela, notre travail se fera dans l'Est algérien, où les études dans cette région sont rares voir même inexistantes et nous allons utiliser deux méthodes différentes pour présenter la répartition temporelle et la distribution spatiale des précipitations.

### Introduction

La région d'étude concerne toute la partie Nord-est de l'Algérie. Une synthèse des caractéristiques géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques sera donnée dans ce chapitre.

#### 1. Situation géographique

La région d'étude est limitée, à l'Ouest par une verticale parcourant Béjaïa, les Monts et Chott Hodna jusqu'aux Monts du Zab, à l'Est par la frontière algéro-tunisienne, au Nord par la mer Méditerranée, et enfin au Sud par Chott Melrhir, au droit d'une ligne Ouled Djellal-Negrine. C'est un quadrilatère que délimitent les méridiens  $4^{\circ}40'$  E et  $8^{\circ}30'$  E et les parallèles  $37^{\circ}10'$  N et  $34^{\circ}20'$  N.

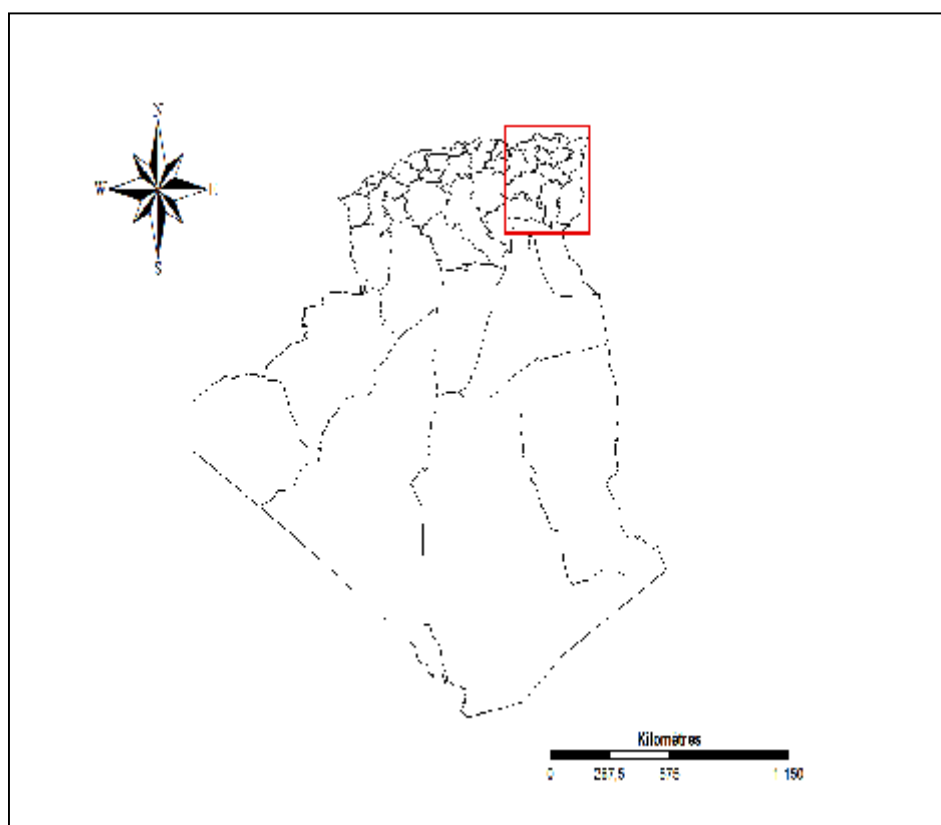
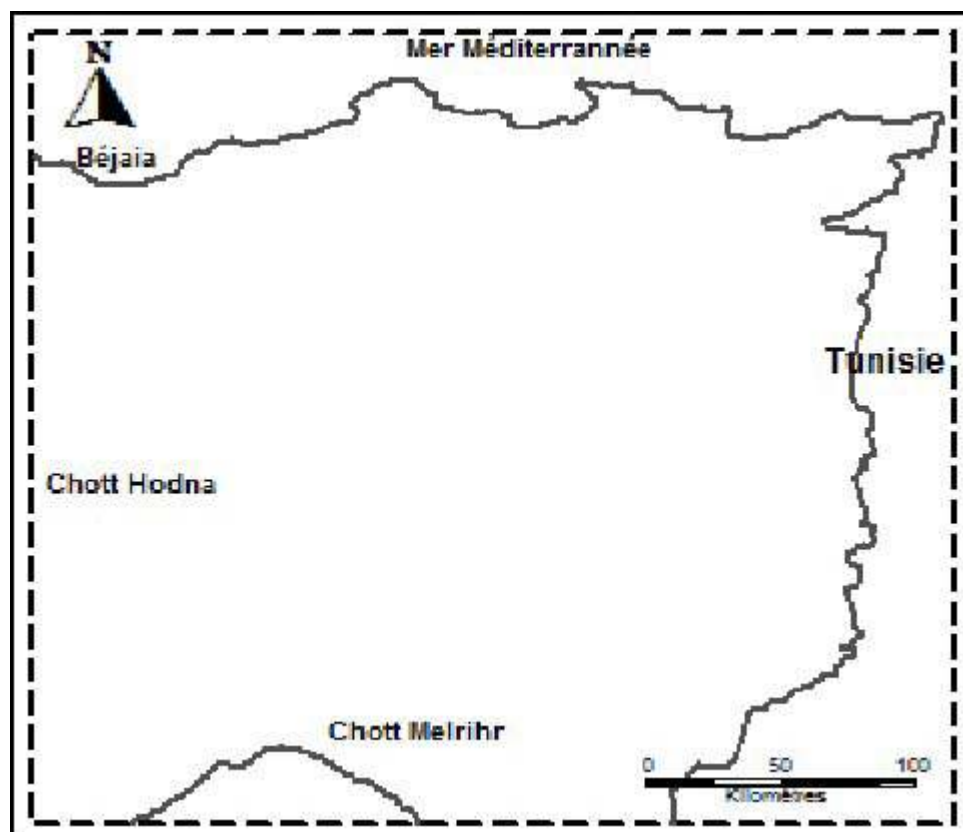


Figure II.3 : Carte de la zone d'étude



**Figure II.4 :** Extrait de carte de la situation géographique

(Carte digitalisée à partir de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord d'Algérie .Edition : ANRH 2005 Echelle : 1/500 000).

## 2. Relief

Le relief est la forme générale de la surface de la Terre. Cette surface n'est pas plane : c'est pourquoi on distingue plusieurs ensembles de relief : les plaines, les plateaux, les montagnes.

La région de l'Est se compose de trois golfes : golfe de Bougie, entre le cap Carbon et le cap Cavallo ; golfe de Philippeville, entre le cap Bou Garoun et le cap de Fer ; golfe de Bône, entre le cap de Garde et le cap Rosa. (Niox ,1980)

❖ Les montagnes du tell ferment deux rides :

- La chaîne des Babor, entre l'oued Sahel et l'oued El Kebir ; se ramification confuse forment la petite Kabylie (djebel Adrar, 1994m ; Grand-Babor, 1970m) ; elle se prolonge entre l'oued El Kébir et l'oued Safsaf, par les monts d'el Kantour.
- la chaîne des Biban (ou des portes de fer) (djebel Maghriz, 1722 m, au nord de Sétif) ; elle se prolonge par les monts des Oulad-Kebbab, et les monts de Constantine.

Les derniers plis des montagnes du Tell sur la frontière de Tunisie sont compris sous le nom des monts de Medjerda, et des monts de Kroumirie.

Les Hauts-Plateaux de l'est n'ont pas la même uniformité ni la même étendue que ceux de l'ouest, ils sont divisés par de petites rides montagneuses, en un assez grand nombre de bassins, dont les bas-fonds qui renferment de petits chotts, des Guerahs (la plus grande est la Guerah El-Tarf, à l'est), des Sbakh (pluriel de sebkha), d'où le nom de Plaine des Sbakh, qui leur est souvent donnée.

Ils sont creusés à l'ouest par une large et profonde dépression, qui renferme le grand chott El Hodna, dont l'altitude n'est que de 500 mètres environ. C'est une sorte de golfe de la mer saharienne.

Il est circonscrit, au nord, par les monts du Hodna (djebel Maadhid, 1840m), les Righa (djebel Bou Thaleb, 1345m), les monts de Batna (djebel Touggour, 2100m), qui relie les monts du Titeri aux monts de l'Aurès, en soutenant les Hauts-Plateaux de Constantine.

La chaîne saharienne comprend :

- les monts du Zab, au sud du chott El-Hodna ;
- le massif de l'Aurès, formé de plis étroits et élevés et dont la cime djebel Chelia (2328m) qui est le point culminant de l'Algérie ;

- les monts des Nemencha (djebel Chediada, 1400m), qui se rattachent à la chaîne saharienne de Tunisie.

❖ Les cours d'eaux :

Sur le versant méditerranéen :

- L'oued sahel (oued Soummam), qui forme la ceinture de la Grande Kabylie ;
- Ses affluents de droite, dont le principal est l'oued Bou-Selam, rivière de Sétif, réunissent les eaux des versant nord des monts du Hodna et Righa, et traversent la fertile plaine de Medjana ;
- L'oued Agrioun, qui traverse les pittoresques défilés El-Akra ;
- L'oued El-Kébir, formé de la réunion du Roummel rivière de Constantine et de l'oued Endja qui vient de la Petite Kabylie.
- L'oued Safsaf, qui finit à Philippeville ;
- La Seybouse, seule rivière algérienne qui porte barque à quelque distance de son embouchure. Elle est formée, en amont de Guelma, de réunion de l'oued Zenati et de l'oued Cherf, qui viennent des Hauts-Plateaux.

La Medjerda, qui est la grande rivière tunisienne, et son principal affluent, l'oued Méllégué, descendent des hauts-plateaux entre Souk Arras et Constantine.

Le chott El-Hodna reçoit quelques cours d'eau importants par la longueur et la fertilité de leurs vallées :

- L'oued Chellal, à l'ouest, réunit les eaux sud du Titeri ;
- L'oued Ksob, et quelques autres descendent des monts du Hodna ;
- L'oued Barika et l'oued Bitam viennent des monts de Batna ;
- Au sud-ouest, l'oued Chair et l'oued Dermel, qui est la rivière de Bou-Saada, viennent des monts des Oulad Nayl.

Toutes les rivières du versant saharien se réunissent dans le bassin du chott Melghir. Celles de l'ouest ont pour canal collecteur l'oued Djedi, qui reçoit en amont de Laghouat les eaux de la partie occidentale du Djebel-Amour.

Les rivières de l'Aurès descendent directement vers le chott. Ce sont :

- L'oued Kantara ou oued Biskra et son affluent l'oued El-Abdi ;
- L'oued El-Abiod ;
- L'oued El-Arab, qui descend du djebel Chelia ;
- L'oued Bou Doukan et l'oued Hallail viennent des monts des Nemencha et se perdent dans les chotts ou bas-fonds qui prolongent, à l'est, le chott Melghir.

La plupart de ces rivières sont à sec pendant la plus grande partie de l'année ; il en est dans le lit desquelles on ne voit jamais couler d'eau. Leur vallées n'en a pas moins grand intérêt parce que, presque toujours, au-dessous du lit supérieur dessèche, se trouve un courant ou une nappe dont on peut, par des forages de puits artésiens, ramener les eaux à la surface.

Ainsi doit-on considérer le chott Melghir et son prolongement sud, chott Merouan, comme les bassins récepteurs non seulement des eaux de la chaîne saharienne du nord, mais aussi des eaux sahariennes venant du sud, et dont les grandes vallées de l'oued Igharghar et de l'oued Miâ, indiquent les anciens lits supérieurs.

L'oued Igharghar a comme delta d'embouchure souterrain les oasis de l'oued-Righ autour de Tougourt.

L'oued Miâ, que l'on peut considérer comme un affluent de l'oued Igharghar, fournit les eaux souterraines aux oasis d'Ouargla et de Ngouça vers lesquelles convergent également l'oued Metlili, l'oued Mzab, l'oued en-Nessa et quelques autres venant de l'ouest.

### 3. Hydrographique

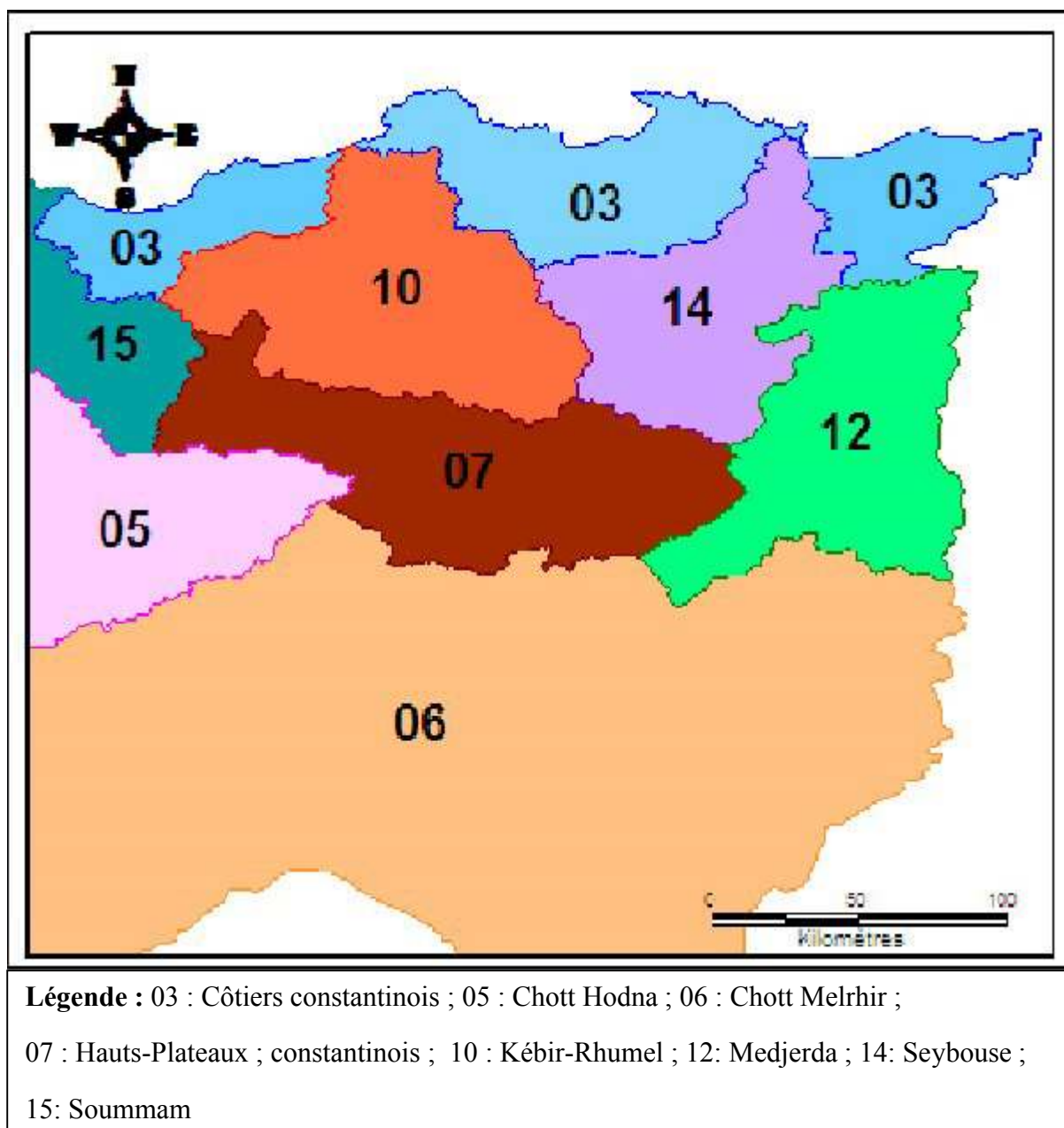
La région de l'Est se décompose en huit bassins hydrographiques répartis en 2 catégories :

- Les bassins tributaires de la mer Méditerranée ; au nombre de 05, des oueds drainant l'atlas (Côtiers constantinois-3, Kébir-Rhumel-10, Medjerda-12, Seybouse-14, Soummam-15).
- Les bassins endoréiques, au nombre de 03, des oueds dont les écoulements se font vers les chotts (Chott Hodna-5, Chott Melrhir-6, Hauts-Plateaux constantinois-7).

**Tableau II. 4 : Superficie des bassins hydrographiques**

<b>Bassins</b>	<b>Nom</b>	<b>Superficie en Km<sup>2</sup></b>
<b>03</b>	Côtiers constantinois	11 400
<b>05</b>	Chott Hodna	6 220
<b>06</b>	Chott Melrhir	42 760
<b>07</b>	Hauts-Plateaux constantinois	9 560
<b>10</b>	Kébir-Rhumel	8 810
<b>12</b>	Medjerda	7 870
<b>14</b>	Seybouse	6 450
<b>15</b>	Soummam	3 060
<b>Total</b>		<b>96 130</b>





**Figure II.4 :** Carte du bassin hydrographique

(Source : Carte digitalisée à partir de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord d'Algérie .Edition : ANRH 2005 Echelle : 1/500 000).

### 4. Géologie

La région est caractérisée du Nord au Sud par de nombreuses unités empilées au cours de phases tectoniques successives. (Vila 1980 ; Wildi 1983). Ces unités sont caractérisées par la complexité et la diversité des styles mais aussi par la diversité de la nature des matériaux qui les composent. (Boudoukha et Messaid, 2014).

- Le domaine interne qui comprend le socle cristallin et sa couverture sédimentaire chevauchant les unités les plus méridionales;
- Le domaine des nappes des Flyschs composé par les séries du Crétacé inférieur formées par des Flyschs grésopélitiques et par les séries gréseuses de l'Oligocène;
- Le domaine externe constitué par les unités ultratelliennes formées par des marno-calcaires du Crétacé inférieur ;
- L'avant-pays allochtone qui se présente sous forme de vastes panneaux du domaine Sud-sétifien à dominance carbonatée du Secondaire, de la nappe néritique constantinoise sous forme de séries carbonatées du Mésozoïque, des formations allochtones de type Sellaoua constituées de marnes et de marno-calcaires du Valanginien-Maestrichtien ;

Les formations autochtones et paraautochtones à dominance carbonatée d'une assez grande homogénéité, du Lias au Crétacé moyen.

Cet édifice complexe de l'Algérie du Nord est partiellement effacé par une sédimentation Moi-Plio Quaternaire essentiellement continentale. Ces terrains post nappes occupent de vastes espaces entre le méridien de Bordj Bouarréridj à l'Ouest et celui de Tébessa à l'Est.

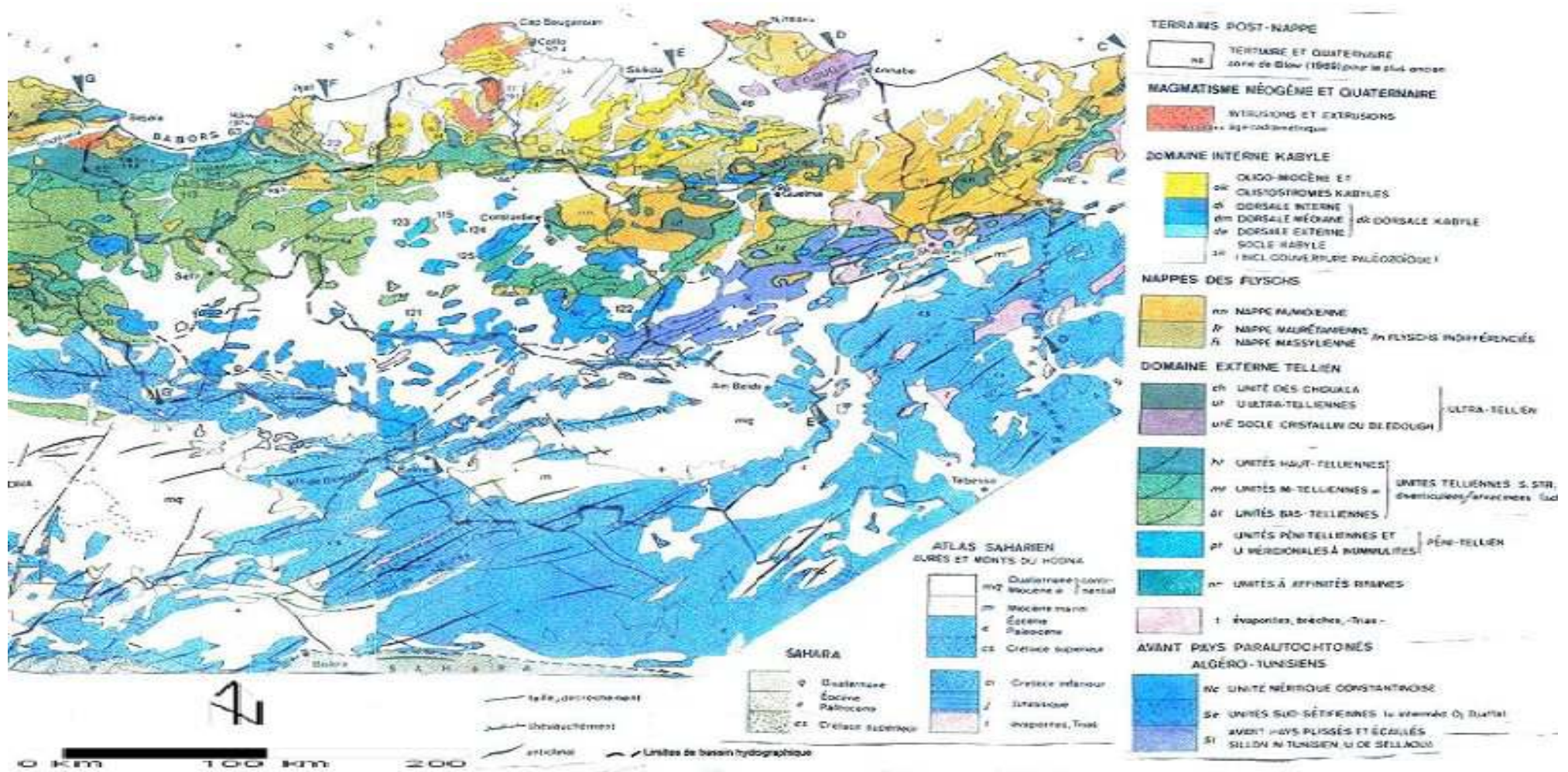


Figure II.6 : Carte géologique de l'Est algérien (D'après Wildi W., 1983)



### 5. Hydrogéologie

Cette configuration géologique s'est traduite sur le plan hydrogéologique par la présence de deux grands types d'aquifères, le premier à porosité d'interstice, le second à perméabilité de fissure et/ou karstique. Le premier type d'aquifère est facilement accessible à l'aide de puits d'une cinquantaine de mètres de profondeur au maximum alors que le second se trouve à des profondeurs moyennes allant de 100 à 250 m. Les aquifères superficiels se trouvent dans les plaines côtières et le long des vallées alluviales comme les nappes de la plaine de Annaba, de la vallée du Safsaf, de la vallée du Guebli, du bas-Kébir, de la plaine de Jijel...,etc. On retrouve également ces aquifères dans les formations du Moi-Plio Quaternaire des Hauts-Plateaux qui s'étalent de Sétif à l'Ouest jusqu'à Tébessa à l'Est en passant par Ain Mlila, Constantine, Oum El Bouaghi, Sedrata, Khenchela, Ain Baida, Meskiana et Tebessa. Les aquifères à porosité de fissure et/ou karstiques, se trouvent dans les formations carbonatées comme en témoigne l'émergence de grosses sources, en partie thermales, (Boudoukha et Athamna 2012) avec un débit relativement important comme celles de Ain Roua (55 l/s), Ras El Ain (15 l/s), Hamma Bouziane (700 l/s), Boumerzoug (450 l/s), Hammam Debagh (1650 l/s), Dehamecha (50 l/s), ...,etc.). Lors de la réalisation des forages dans ces aquifères, la karstification se manifeste par des pertes importantes de bentonite (Boudoukha et Messaid, 2014).

### 6. Climat de la région

L'Est algérien est la région la plus variée du pays sur le plan climatique. Aussi, tout bilan hydrologique se trouve-t-il directement influencé par les nuances du climat, plus spécialement par deux paramètres déterminants : pluviométrique (conditionnant l'alimentation en eau des rivières) et évaporométrique (pertes ou retour de l'eau à l'atmosphère).

Par ailleurs, toute mise en valeur hydro-agricole doit tenir compte de cette variété même s'il est vrai que l'irrigation est nécessaire quelque soit la situation géographique, pour faire face au déficit hydrique des mois « secs » et aux irrégularités interannuelles des pluies. (Mebarki, 2009).

### 6.1. Précipitations

Schématiquement, les précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur suivant un fort gradient latitudinal, altéré néanmoins par l'effet orographique de l'Atlas saharien, avant de s'accroître à nouveau dans le Piémont saharien où les pluies se raréfient. Les cartes pluviométriques de l'Algérie (Seltzer P., 1946 ; Gausson H., 1948 ; Chaumont M. et Paquin C., 1971 ; A.N.R.H., 1993) retracent toutes cet ordonnancement des précipitations. La dernière carte en date permet de faire ressortir des zones de fortes précipitations (supérieures à 900 mm) dans la zone montagneuse Nord-Ouest, allant de Bejaia à Collo, ainsi que dans les tranches d'altitude les plus élevées des Monts de la Medjerda et du massif de l'Edough dans le Nord-Est. La pluie atteint plus de 1 400 mm sur les hauteurs d'Erraguène et jusqu'à 1800 mm sur le massif de Collo, avec 1689 mm à la station de Zitouna. Les isohyètes de 600 à 800 mm balayent tout le reste de l'Atlas tellien avec cependant des contrées beaucoup plus pluvieuses dans la région extrême Est (El Kala).

Les Hautes Plaines sont nettement cernées dans leur bordure Nord par l'isohyète 500 mm. La pluviométrie décroît vers la bordure Sud (350 mm) avec des creux assez nets (moins de 300 voire moins de 200 mm) dans la zone des lacs salés. C'est le même creux que l'on observe sur la cuvette du Chott Hodna, traversée par les isohyètes 300 et 250 mm.

L'Atlas saharien, en raison de l'effet orographique et l'exposition du versant Nord, enregistre une remontée du total pluviométrique vers des valeurs de 400 à 600 mm par an ; les sommets de l'Aurès pouvant recevoir plus de 600 mm. L'isohyète 300 mm marque l'amorce de la décroissance des précipitations sur le piémont Sud de l'Atlas dont la bordure méridionale est jalonnée par l'isohyète 200 mm et même 150 mm.

Deux groupes de facteurs, géographiques (éloignement par rapport à la mer, altitude, exposition des versants par rapport aux vents pluvieux du Nord-Ouest) et météorologiques (déplacement des masses d'air polaire océanique, froid et humide, des masses d'air tropical chaud et humide de l'Atlantique Sud et enfin des masses d'air

tropical continental ou anticyclone saharien) influencent la répartition spatiale des précipitations mais aussi les structures des régimes pluviométriques (Chaumont M. et Paquin C., 1971). Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat algérien. La carte de l'A.N.R.H. montre que les moyennes pluviométriques sont inférieures d'environ 10 % à celles de la série de Chaumont M. et Paquin C., ces deux auteurs ayant eux-mêmes constaté une diminution des précipitations par rapport à celles cartographiées par Seltzer P. (Mebarki, 2009).

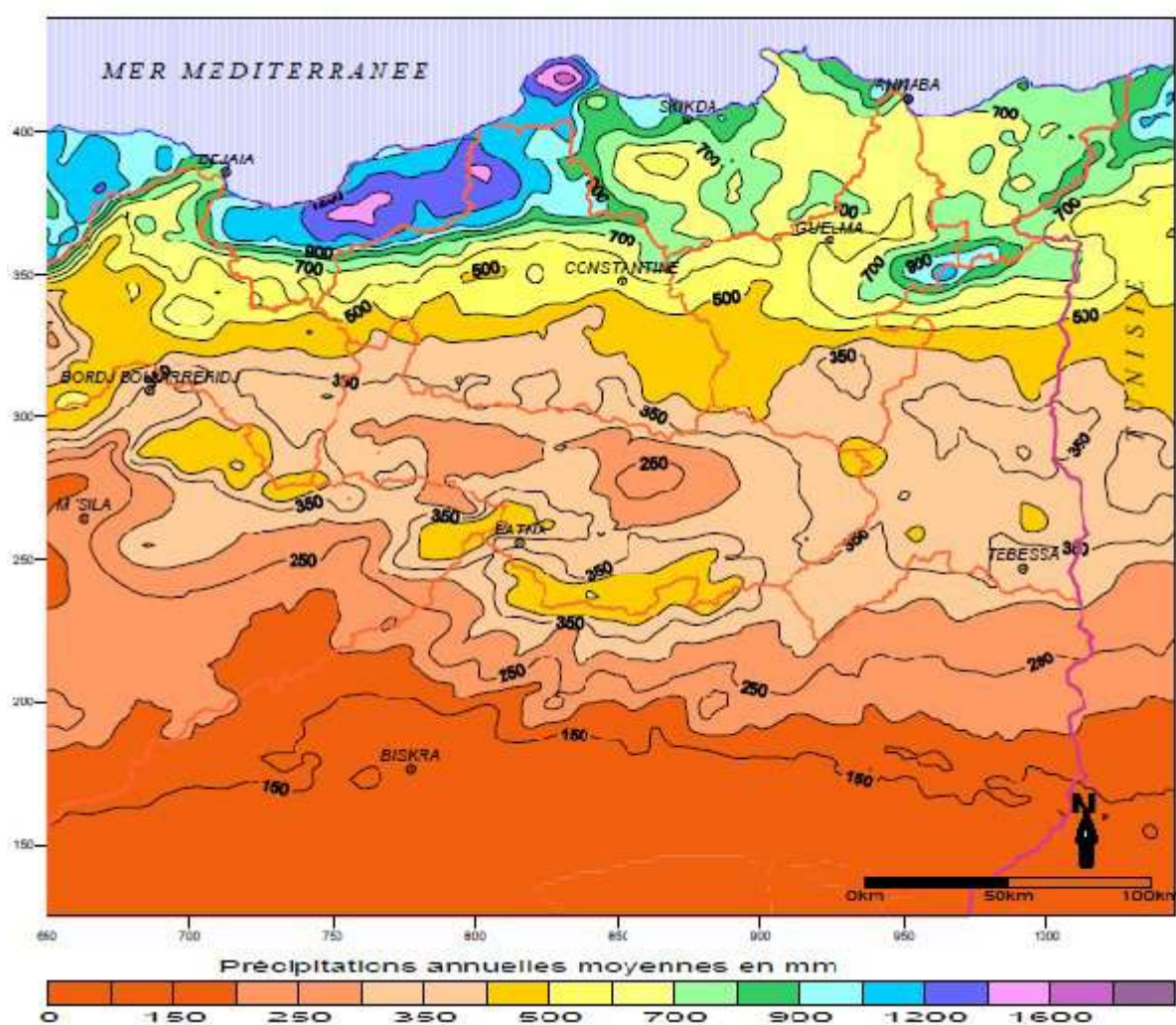


Figure II.7 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (Mebarki, 2009)

### Conclusion

La zone d'étude concerne la partie orientale de l'Algérie qui se trouve limitée au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la frontière tunisienne, latitude 34° Sud et longitude 5° Ouest. La surface totale de cette zone est d'environ 96 130 Km<sup>2</sup>.

La région de l'Est se décompose en huit bassins hydrographiques répartis en 2 catégories : les bassins tributaires de la mer Méditerranée et les bassins endoréiques.

La région de l'Est est la région la plus variée du pays sur le plan climatique. Schématiquement, les précipitations décroissent du littoral (Nord) vers l'intérieur (Sud). La température moyenne annuelle de cette région, varie entre 17,6 °C au Nord, 13 °C au centre et 21,8°C au Sud.

### Introduction

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

#### 1. Choix des stations pluviométriques à étudier

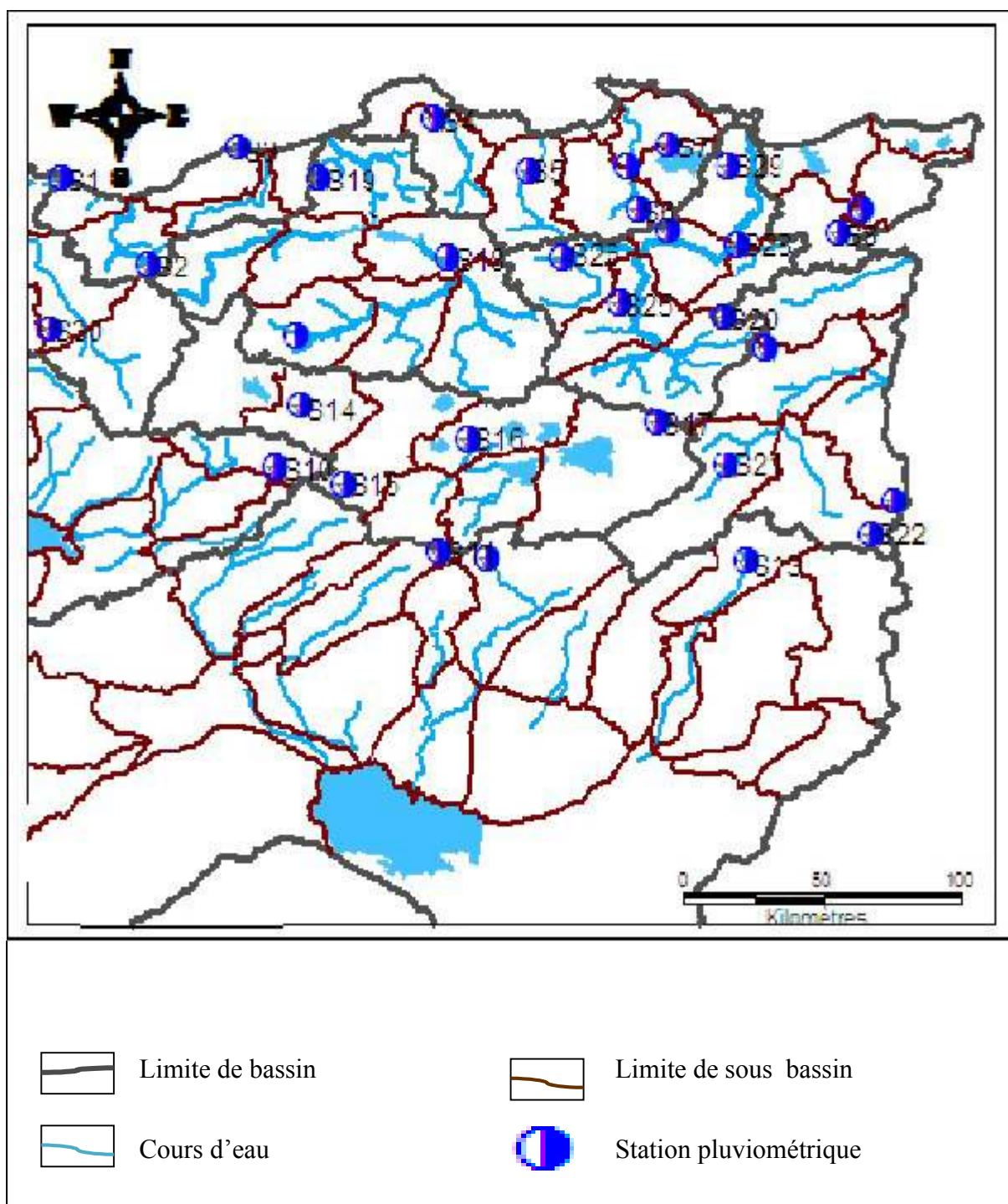
Nous avons retenue dans cette étude 32 stations répartie d'une manière plus au moins homogènes sur toutes la zone d'étude avec des séries de précipitations annuelles datant de l'année 1970 jusqu'à l'année 2009.

Le choix du réseau des stations doit répondre aux critères suivants :

- La période d'étude doit être d'au moins 30 ans.
- Chaque sous-bassin (SB) est représenté par une station pluviométrique choisie.
- Les séries des données sont très longues avec le minimum possible de lacunes.

Les stations retenues sont représentées dans le tableau III.5 et sur la carte de la figure III.8.





**Figure III.8:** Situation géographique des postes pluviométriques de la zone d'étude

(Carte digitalisée à partir de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord d'Algérie .Edition : ANRH 2005 Echelle : 1/500 000).

**Tableau III.5 :** Caractéristiques géographiques des stations pluviométriques de la zone d'étude

N°	Codes	Nom de la station	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
S1	030104	DOMAINE DEHAS	712,8	381,2	7
S2	030204	AMOUCHA	743,6	346,15	800
S3	030301	JIJEL SECTEUR	774,1	396,15	5
S4	030712	AFFLASSANE	841,2	410,1	35
S5	030909	RAMDANE DJAMEL DE BERAIS	874,95	389,85	50
S6	031105	BOUATI MAHMOUD	914,5	375,6	150
S7	031201	AIN CHERCHAR	909,5	393,2	34
S8	031302	BERRAHAL	923,35	403,1	40
S9	031503	BOUHADJAR (BORDJ DJILET)	984,2	369,75	300
S10	031604	AIN KERMA	991,46	379,27	280
S11	051201	MEROUANA	790,75	263,65	1000
S12	061503	MEDINA	849,7	230,5	1570
S13	061803	BOU HAMMAMA	867	228,5	1140
S14	062301	CHERIA	959,05	231,15	234
S15	070201	AIN DJASSER	798,35	289,1	865
S16	070316	BATNA	814,7	257,35	1040
S17	070502	BOULHILET	858,4	277,55	859
S18	070707	AIN BEIDA	924,15	288	1004
S19	100303	TADJENANET	796,15	318	845
S20	100603	HAMMA BOUZIANE	848,5	352,8	460
S21	100708	OULED MESSAOUDA	802,2	384,2	585
S22	120104	KHEMISSA	945,5	332,5	900
S23	120201	MESKIANA	949,7	271	845
S24	120307	BEKKARIA	1002,35	244,55	895
S25	120403	MDAOUROUCH	960,85	320,65	870
S26	120504	EL KOUIF	1009,7	259,15	1100
S27	140205	AIN MAKHLOUF (GUETARA)	909,01	336,81	834
S28	140302	BORDJ SABATH	888,74	355,02	525
S29	140403	HELIOPOLIS	925,15	366,85	280
S30	140505	BOUCHEGOUF	949,19	362,49	800
S31	140609	EL KERMA	944,6	395,5	14
S32	150707	BIR KASD ALI	709,5	318,4	980

Tableau III.6 : Stations choisies pour l'analyse et taux des lacunes

Station	Nb observation	Nb lacunes	taux %
ST 030104	34	5	12,8
ST 030204	37	2	5,1
ST 030301	34	5	12,8
ST 030712	28	11	28,2
ST 030909	31	8	20,5
ST 031105	20	19	48,7
ST 031201	28	11	28,2
ST 031302	19	20	51,3
ST 031503	21	18	46,2
ST 031604	24	15	38,5
ST 051201	30	9	23,1
ST 061503	37	2	5,1
ST 061803	35	4	10,3
ST 062301	26	13	33,3
ST 070201	34	5	12,8
ST 070316	36	3	7,7
ST 070502	34	5	12,8
ST 070707	32	7	17,9
ST 100303	32	7	17,9
ST 100603	34	5	12,8
ST 100708	35	4	10,3
ST 120104	24	15	38,5
ST 120201	29	10	25,6
ST 120307	26	13	33,3
ST 120403	27	12	30,8
ST 120504	34	5	12,8
ST 140205	18	21	53,8
ST 140302	24	15	38,5
ST 140403	25	14	35,9
ST 140505	14	25	64,1
ST 140609	35	4	10,3
ST 150707	34	5	12,8

### 2. Méthodes de comblement de lacunes

Les séries pluviométriques retenues présentent des lacunes qui peuvent provenir de l'instabilité de fonctionnement des stations et du changement de leurs sites.

L'estimation des données manquantes ou erronées d'une station peut être faite à partir des valeurs provenant des stations voisines soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone géographique. Suivant les cas, trois méthodes sont proposées pour la restitution des données pluviométriques:

- Remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche ;
- Remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines. Cette méthode est utilisée lorsque les précipitations moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10 % des précipitations moyennes annuelles aux stations de référence.
- Remplacer la valeur manquante par la méthode de régression, et pour que cette méthode soit efficace, il faut que la régression soit linéaire et que le coefficient de corrélation soit élevé.

Pour reconstituer les données manquantes dans les séries pluviométriques sur lesquelles on a travaillé, nous avons utilisé la méthode de la régression linéaire à l'aide de logiciel XLstat .2013.2 (annexe 1).

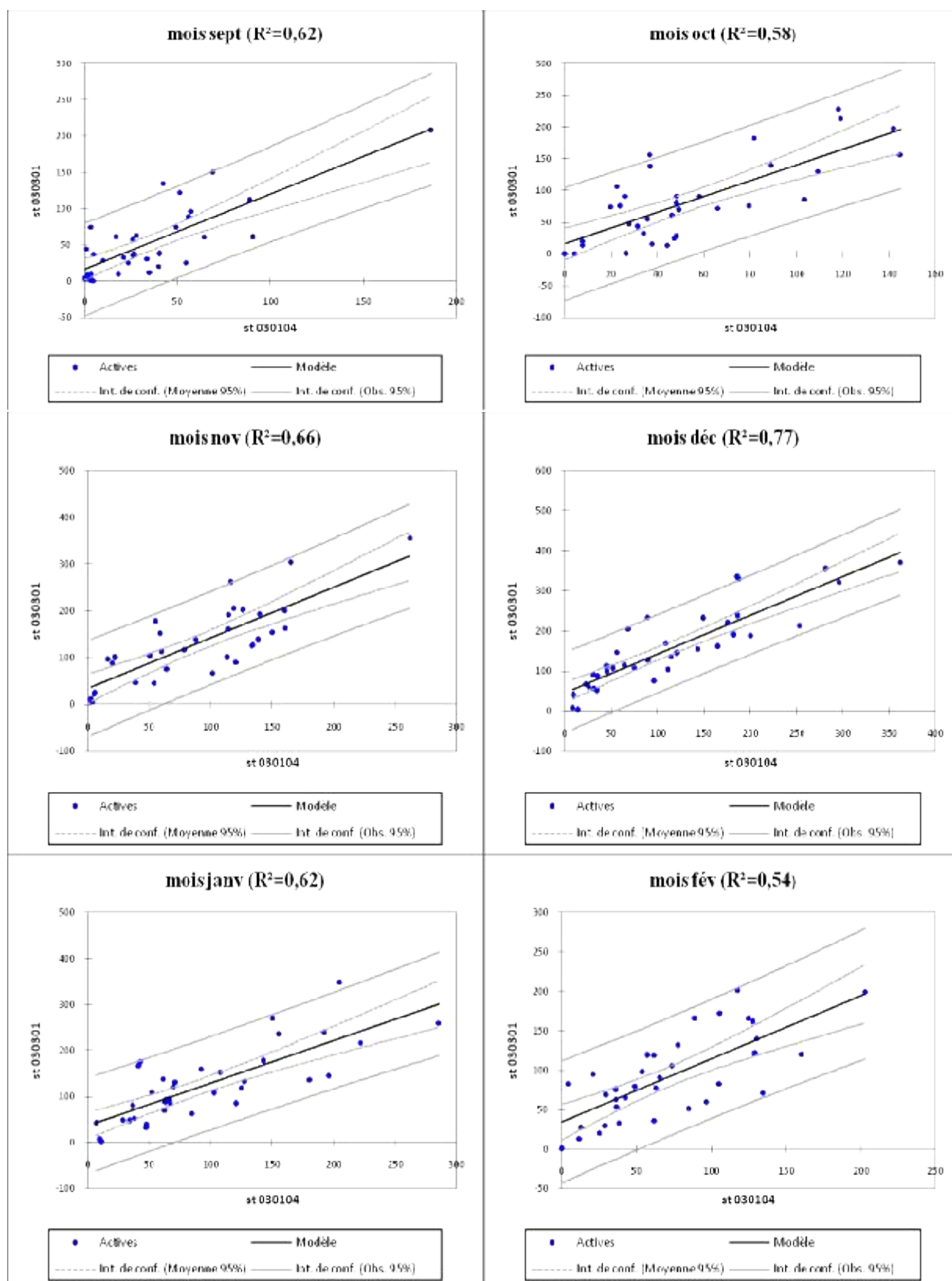


Figure III.9: Régression linéaire (exemple Régression de st 030104 par st 030301 )

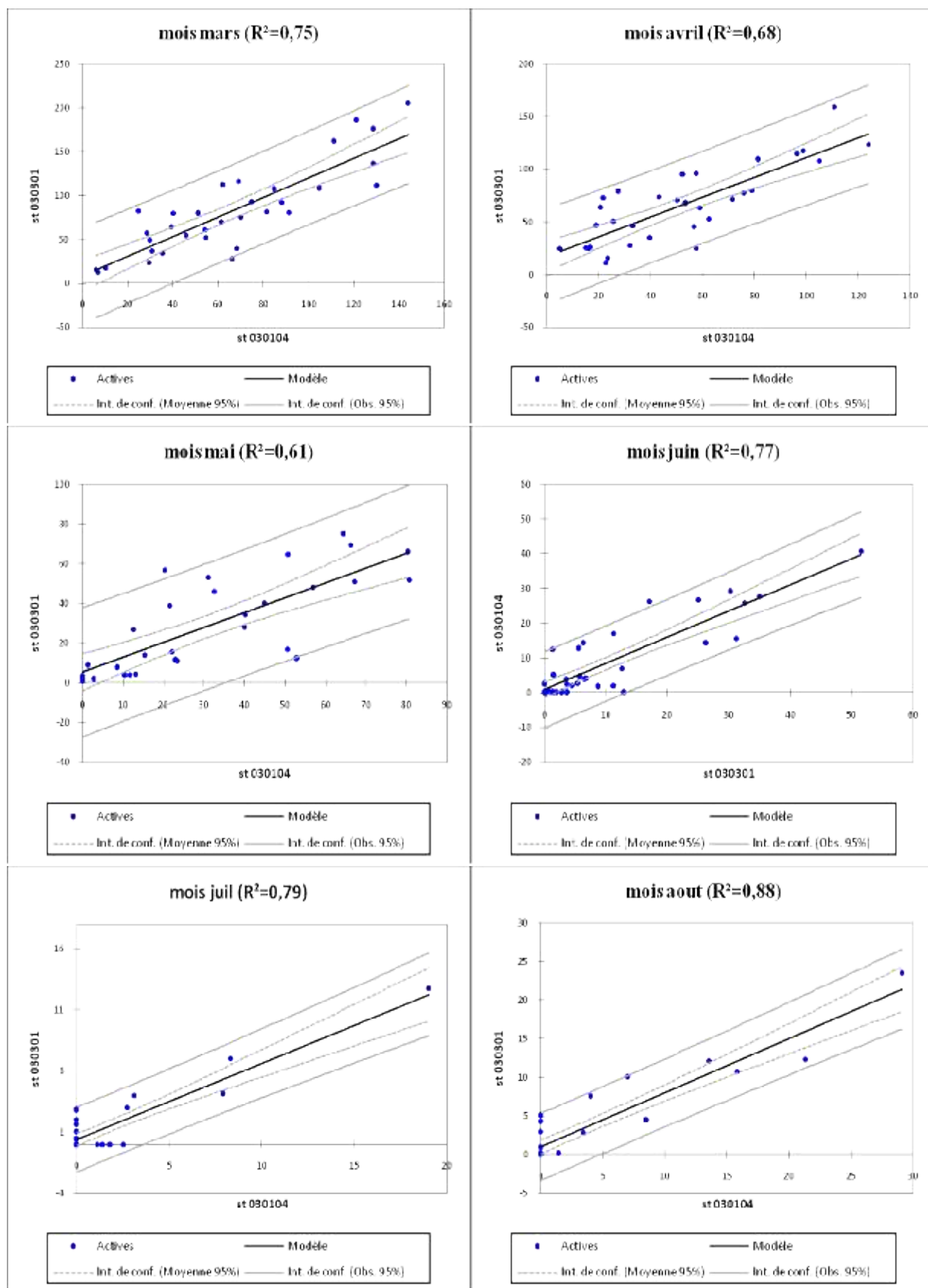


Figure III.9 (suite) : Régression linéaire (exemple Régression de st 030104 par st 030301 )



### 3. Vérification des hypothèses de base

Nous avons utilisé les tests de Wald-Wolfowitz, de Kendall et de Wilcoxon pour vérifier si les données collectées sont stationnaires (caractéristiques statistiques ne varient pas dans le temps), indépendantes (aucune auto-corrélation) entre les observations) et homogènes (proviennent de la même distribution). Ces tests sont intégrés dans le logiciel Hyfran.

#### 3.1. Test de l'indépendance

L'application des méthodes statistiques repose sur la validité de certaines hypothèses de base relative à la constitution de l'échantillon observé. En effet le fichier recueilli doit être constitué par une série d'observation indépendante formant ce que l'on appelle un échantillon extrait au hasard de la population statistique. En d'autres termes l'échantillon.

Soit  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$  ; les termes de la série étudiée ; dans cette étude on a appliqué le test de Wald-Wolfowitz. Le test est basé sur le critère qu'aucune observation appartenant à l'échantillon ne devrait influencer l'observation suivante :

La statistique du test est :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_N \quad (\text{III-16})$$

Et :

$$x_i = y_i - \bar{y} \quad (\text{III-17})$$

Où :

$N$  : étant le nombre d'observations

$\bar{y}$  : étant la moyen de la série.

R suit une loi normale de moyen et de variance :

$$\bar{R} = \frac{(S_1^2 - S_1)}{(N-1)} \quad \text{(III-18)}$$

$$\text{var}(R) = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} - \bar{R}^2 + \frac{(S_1^4 - 4S_1^2 S_2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4)}{(N-1)(N-2)} \quad \text{(III-19)}$$

Où :

$$S_i = N * m_i$$

$m_i$  : étant le moment d'ordre  $i$

Le test se ramène au calcul de la quantité :

$$U = \frac{(R - \bar{R})}{(\text{var}(R))^{1/2}} \quad \text{(III-20)}$$

- Si  $\alpha_0$  est le niveau de signification du test ; U doit être comparé à  $U_{\alpha/2}$ .
- Si  $\|U\| < 1,96$  l'hypothèse d'indépendance est acceptée à 5% de signification.
- Si  $1,96 < \|U\| < 2,57$  l'hypothèse d'indépendance est rejetée à un seuil de signification de 5% mais acceptée à 1%.
- Si  $\|U\| > 2,57$  l'hypothèse d'indépendance est rejetée à 1% de signification. (Bobee.1999).

### 3.2. Test de stationnarité

On dit que les observations sont stationnaires si les caractéristiques statistiques (moyenne, variance, ...) de la série ne varient pas dans le temps.

Nous avons utilisé le test Kendall pour procéder à la vérification de l'hypothèse de stationnarité.

Soit  $n$  variables aléatoires  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  classées par ordre chronologique.

La statistique  $S$  de ce test s'exprime par l'équation suivante :



$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i) \quad (\text{III-21})$$

$$\begin{cases} 1 \text{ si } x > 0 \text{ concordance avec les rangs} \\ \text{Sng} = 0 \text{ si } x = 0 \\ -1 \text{ si } x < 0 \text{ discordance avec les rangs} \end{cases}$$

### 3.3. Test de l'homogénéité

Les échantillons sont dits homogènes, s'ils sont caractérisés par une même loi de probabilité et par les mêmes paramètres, les données recueillies alors sont considérées comme extraites d'une même population.

Dans notre travaille, nous avons utilisé le test de Wilcoxon dont le principe consiste à ranger dans l'ordre croissant l'ensemble des observations.

Soit deux échantillons X et Y :  $N_1$  et  $N_2$  sont les tailles de ces échantillons.

Convenons que le premier échantillon est celui dont la taille est la plus petite (ou dont la taille n'est pas supérieure à celle du second) de sorte que dans ce qui suit nous aurons :  $N_1 \leq N_2$ .

Le test de Wilcoxon se base sur le principe suivant :

Si l'échantillon X est issu de la même population Y, l'échantillon XUY est également issu.

On construit à l'aide des échantillons réunis, la série de variation qui sera composée de  $N_1 + N_2$  valeurs.

Par la suite, on s'intéresse au rang de chacun des éléments de deux échantillons dans cette série.

Si une même valeur se répète plusieurs fois, on lui associe le rang moyen correspondant.

On calcule la somme  $W_x$  des rangs d'éléments du premier échantillon dans la série commune :

$$W_x = \sum |Rang| \quad (III-22)$$

Wilcoxon a montré que dans le cas où les deux échantillons X, Y constituent une série homogène, la quantité  $W_x$  est comprise entre deux bornes  $W_{\max}$  et  $W_{\min}$  données par les formules suivantes :

$$W_{\min} = \frac{(N_1 + N_2 + 1)}{2} - U_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \quad (III-23)$$

$$W_{\max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{\min} \quad (III-24)$$

$U_{1-\alpha/2}$  : représente la valeur de la variable centrée réduite de la loi normale correspondante à  $1-\alpha/2$ .

Si  $W_{\min} < W_x < W_{\max}$  l'hypothèse de l'homogénéité est acceptée. (Bobee.1999).

### Remarque

Les séries pluviométriques ont été testées à l'aide du logiciel Hyfran au seuil de signification de 5% ; mais dans notre cas, même les échantillons acceptés au niveau de signification 1% sont aussi retenus et ce, pour pouvoir exploiter le maximum de valeurs réellement collectées. Les résultats des tests figurent dans le tableau 7 suivant :

Tableau III.7: Résultats des tests

Nom de la station	Code	Test de Wold-Wolfowitz	Test de Kendall	Test de Wilcoxon
		U	K	W
DOMAINE DEHAS	ST 030104	0.25	0.48	0.95
AMOUCHA	ST 030204	0.17	0.22	0.30
JIJEL SECTEUR	ST 030301	0.46	1.7	1.3
AFFLASSANE	ST 030712	1.3	1.6	0.79
RAMDANE DJAMEL De Berais	ST 030909	0.18	0.082	0.081
BOUATI MAHMOUD	ST 031105	0.59	1.5	1.3
AIN CHERCHAR	ST 031201	<b>3.0</b>	<b>3.3</b>	2.3
BERRAHAL	ST 031302	0.43	0.76	0.46
BOUHADJAR (BORDJ DJILET)	ST 031503	0.65	0.42	0.11
AIN KERMA	ST 031604	0.92	0.28	1.1
MEROUANA	ST 051201	0.17	1.4	0.98
MEDINA	ST 061503	1.7	1.7	0.91
BOU HAMMAMA	ST 061803	2.1	1.6	1.6
CHERIA	ST 062301	0.24	0.082	0.41
AIN DJASSER	ST 070201	0.67	2.3	2.0
BATNA	ST 070316	1.0	0.44	0.56
BOULHILET	ST 070502	0.96	1.1	2.1
AIN BEIDA	ST 070707	0.46	0.38	0.81
TADJENANET	ST 100303	2.2	<b>2.7</b>	1.4
HAMMA BOUZIANE	ST 100603	1.6	0.54	0.054
OULED MESSAOUDA	ST 100708	0.052	1.4	1.5
KHEMISSA (RUINES DE)	ST 120104	0.45	0.72	0.93
MESKIANA	ST 120201	0.21	0.83	0.027
BEKKARIA	ST 120307	0.97	0.10	0.79
MDAOUROUCH	ST 120403	0.24	0.13	0.19
EL KOUIF	ST 120504	0.018	0.058	0.081
AIN MAKHLOUF (GUETARA)	ST 140205	0.92	0.36	0.79
BORDJ SABATH	ST 140302	0.61	1.6	1.5
HELIOPOLIS	ST 140403	0.83	0.78	0.49
BOUCHEGOUF	ST 140505	0.74	0.66	1.1
EL KERMA	ST 140609	0.30	1.5	1.6
BIR KASD ALI	ST 150707	1.1	1.0	0.84

Les résultats du tableau III.7 montrent que les données des stations sont indépendantes, stationnaires et homogènes à l'échelle annuelle.

Nous avons trente deux (32) stations pluviométriques testées, seulement trente (30) d'entre elle qui ont été retenues sont indépendantes, stationnaires et homogènes. Les deux stations pluviométriques 031201 et 100303 sont rejetées, car elles ne répondent pas aux hypothèses d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité.

#### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons retenue 32 stations répartie d'une manière plus au moins homogènes sur toutes la zone d'étude avec des séries de précipitations annuelles. Mais les séries pluviométriques retenues présentent des lacunes. Pour reconstituer les données manquantes dans les séries pluviométriques nous avons utilisé la méthode de la régression linéaire à l'aide de logiciel XLstat .2013.2

Après, nous avons utilisé les tests de Wald-Wolfowitz, de Kendall et de Wilcoxon pour vérifier si les données collectées sont stationnaires, indépendantes et homogènes à l'aide du logiciel Hyfran.

A la fin, nous avons abouti à un fichier de données prêt à être utilisé dans notre travail.

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodologies du calcul. Nous avons utilisé deux méthodes, la première est le SPI qui permet de déterminer la rareté d'une sécheresse ou d'un événement irrégulièrement distribué à une échelle de temps particulière pour n'importe quel endroit dans le monde et la deuxième est l'ACP qui permet de regrouper des informations homogènes et d'éviter la redondance.

### **1. Indice Standardisé des Précipitations (SPI)**

#### **1.1. Définition de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)**

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

L'indice de précipitations normalisé (McKee et al. 1993 ; 1995) est un indice simple, puissant et souple à la fois, et basé sur des données pluviométriques et permet tout aussi bien de vérifier les périodes/cycles humides que les périodes/cycles secs. Le SPI compare les précipitations sur une certaine période, en principe, 1 à 24 mois à la moyenne à long terme de précipitations. Toutefois, il faut au moins des relevés pluviométriques mensuels étalés sur 20 à 30 ans, mais de préférence, sur 50 à 60 ans pour calculer le SPI (Guttman, 1994). Les climatologues préféreraient travailler sur des séries de données complètes, c'est-à-dire des séries ne comportant aucune donnée manquante. (Jouili, 2012).

Le calcul du SPI consiste à soustraire la moyenne annuelle des précipitations au cumul de la pluie pour une année et de diviser le résultat par l'écart-type de la série (Sarr, 2008).

L'Organisation Météorologique Mondiale a adopté l'indice de précipitations normalisé (SPI) en 2009 comme instrument mondial pour mesurer les sécheresses météorologiques, aux termes de la Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse. L'OMM en promeut l'utilisation par les services nationaux météorologiques et hydrologiques en association avec d'autres indices utilisés dans chaque région et l'instrument sera soumis à l'approbation du Congrès Météorologique Mondial lors de sa seizième session en juin 2011. (Jouili, 2012).

### **1.2. Interprétation du SPI**

McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification présenté dans le tableau des valeurs de l'indice SPI figurant ci-après (tableau IV.8) pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice.

Les valeurs 1,00 et au-dessus, représentent les classes humides, à -1,00 et moins, représentent les classes sèches avec près de la normale des conditions allant de - 0,99 à + 0,99.

**Tableau IV.8 :** Interprétation du SPI par rapport à leur valeur et leur probabilité au non-dépassement selon Mckee (1993)

Classes SPI	Probabilités cumulatives du SPI	Interprétations
$SPI \geq 2$	Prob. $SPI \geq 0,9772$	Très Humide (TH)
$1,50 \leq SPI < 2$	$0,9332 \leq$ Prob. $SPI < 0,9772$	Humide (H)
$1 \leq SPI < 1,50$	$0,8413 \leq$ Prob. $SPI < 0,9332$	Modérément Humide (MH)
$-1 < SPI < 1$	$0,1587 <$ Prob. $SPI < 0,8413$	Normale (N)
$-1,50 < SPI \leq -1$	$0,0668 <$ Prob. $SPI \leq 0,1587$	Modérément Sec (MS)
$-2 < SPI \leq -1,50$	$0,0228 <$ Prob. $SPI \leq 0,0668$	Sec (S)
$SPI \leq -2$	Prob. $SPI \leq 0,0228$	Très Sec (TS)

### 1.3. Avantages et inconvénients de la méthode

#### ○ Avantages

- ✓ L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation: il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps.
- ✓ Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.
- ✓ Différentes régions peuvent être comparées.
- ✓ Les périodes humides sont aussi surveillées.

○ **Inconvénients**

- ✓ L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations.
- ✓ Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).
- ✓ Grâce à une variante de l'indice qu'ils ont mis au point, Vicente-Serrano et al. (2010) tentent de régler le problème mentionné ci-dessus en prenant en compte la température dans les calculs du nouvel indice qu'ils nomment indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (SPEI).

## **2. Analyse en composantes principales (ACP)**

### **2.1. Principe de la méthode**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est un procédé statistique essentiellement descriptif : son objectif principal est de présenter, d'une manière graphique, le maximum d'informations contenues dans une matrice de données. Pearson. K, en 1901, a été le premier chercheur à développer les principes de base de cette méthode. Cependant, l'utilisation de l'ACP est récente, Actuellement, l'ACP a beaucoup d'applications (Joina et al., 1997 ; Wotling et al., 2000), elle permet surtout de mettre en évidence les variables redondantes et donc de ne retenir que les plus importantes, et ce, afin de sélectionner les caractéristiques (variables hydrologiques) qui sont employées dans une analyse régionale, mais aussi pour vérifier, de manière quantitative, la corrélation entre les différentes caractéristiques physiographiques employées dans l'étude. On l'utilise même pour former des groupes de variables qui suivent un même type de comportement. De façon plus précise, l'ACP permet de connaître la structure des variables associées entre elles et ayant la même direction ou les groupes que l'on peut former avec elles.

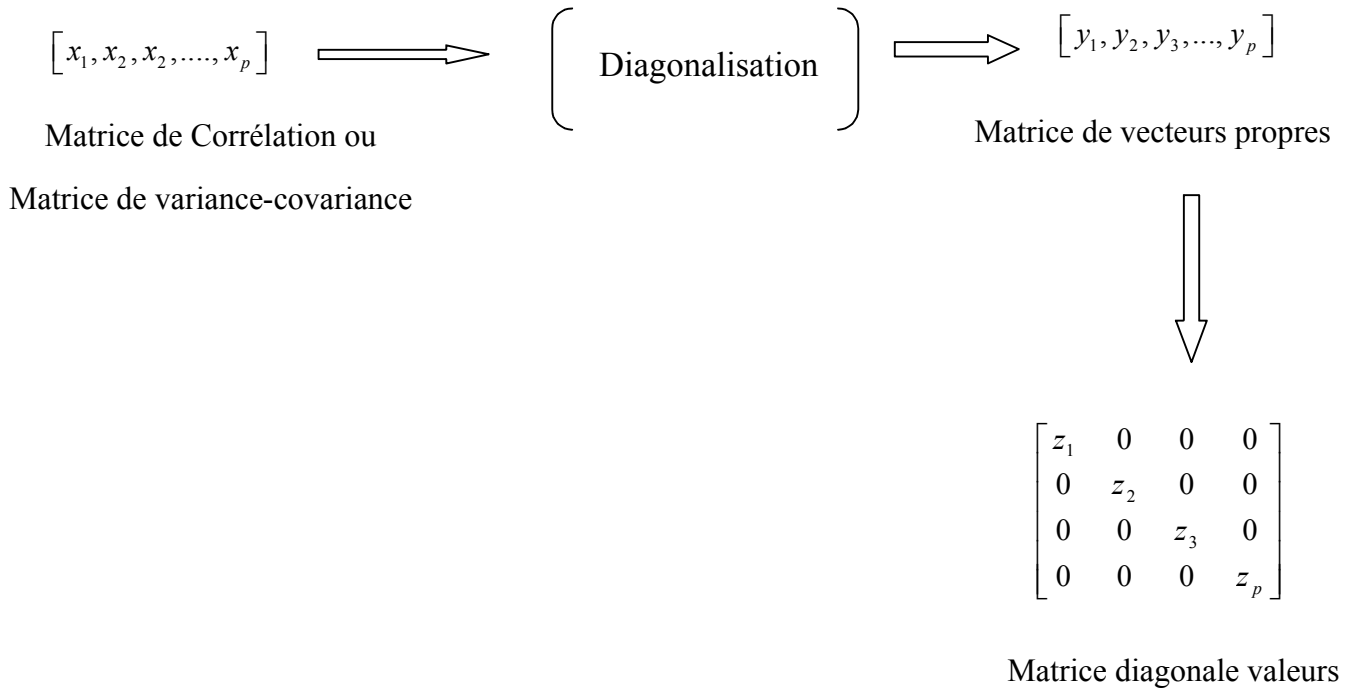


## 2.2. Description de la méthode

La matrice de données est formée par des lignes, qui correspondent aux sites de mesure (stations) et des colonnes, qui contiennent les caractéristiques ou variables de mesure (précipitations, usage du sol, localisation, couverture végétale, etc.). Ces variables doivent représenter de la meilleure manière possible le phénomène étudié (Obled, 1979). Le principe de ce procédé se fonde sur l'idée que les  $p$  variables quantitatives de cette matrice de données peuvent être représentées en un espace de  $p$  dimensions ; bien évidemment, il n'est pas possible de créer ni de visualiser cet espace. L'ACP permet alors de trouver les espaces visibles, avec des dimensions plus petites, où les variables utilisées peuvent facilement être visualisées.

L'ACP cherche des indices qui permettent de visualiser de la meilleure manière possible tous les sites de mesure, c'est-à-dire qu'elle détermine les indices qui maximisent la variance dans les séries chronologiques de chaque site. On appelle cet indice de maximisation « première composante principale » (premier axe principal), laquelle explique une grande partie de la variance totale, dans les différents sites de mesure. Ensuite, on cherche une deuxième composante principale pour compléter l'information acquise grâce à la première. Le procédé se poursuit jusqu'à trouver les composantes principales  $C_p$ . Il convient de signaler que l'information contenue dans chacune des composantes est de moins en moins importante. La transformation des  $C_p$  variables quantitatives initiales qui sont, d'une certaine manière, liées entre elles en  $C_p'$  nouvelles variables quantitatives, non liées, appelées composantes principales, comprend les deux étapes suivantes. Puisque les résultats de l'ACP sont influencés par l'ordre de magnitude des variables, les variables qui ont le poids le plus important apparaîtront de manière plus éparse. Pour éviter cette situation, la première étape consiste à exprimer les variables dans les mêmes unités, et si cela n'est pas possible, il est recommandé de donner la même importance (poids) aux différentes variables, c'est-à-dire de les réduire en les divisant par leur écart-type. Cette analyse peut employer la matrice de variance-covariance ou, à la place, la matrice de corrélation.

La deuxième étape consiste à réaliser une opération mathématique que l'on connaît sous le nom de « diagonalisation ». Ce procédé trouve les coefficients des combinaisons linéaires des  $C_p$  variables initiales, appelés « vecteurs propres ». Finalement, la variance de chacune des stations, sur les axes principaux, sera donnée par les valeurs de  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$ . (Martin, 2003).



### 2.3. Nombre d'axes à retenir

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

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

#### 2.4. A.P.C sans rotation

Le maximum d'informations se trouve dans la 1<sup>ère</sup> composante. Cette dernière décrit l'effet de masse. La majorité des stations ont tendance à décrire un ensemble commun. Par contre, les deux composantes, la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> ont tendance à différencier les stations les plus lointaines et elles sont moins informatives.

#### 2.5. A.C.P avec rotation

Elle permet d'améliorer l'interprétation des résultats par une transformation linéaire des composantes principales. La méthode utilisée est du type Varimax, reconnue comme étant la méthode la plus utilisée des rotations orthogonales ; elle permet de maximiser les informations à l'aide des résultats des coefficients de saturation et aussi de mieux différencier les régions par groupes de stations.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons revu les notions de base qui nous permettent d'appliquer les méthodes suggérées. Les résultats obtenus ainsi que leur interprétation sont contenus dans notre cinquième chapitre.

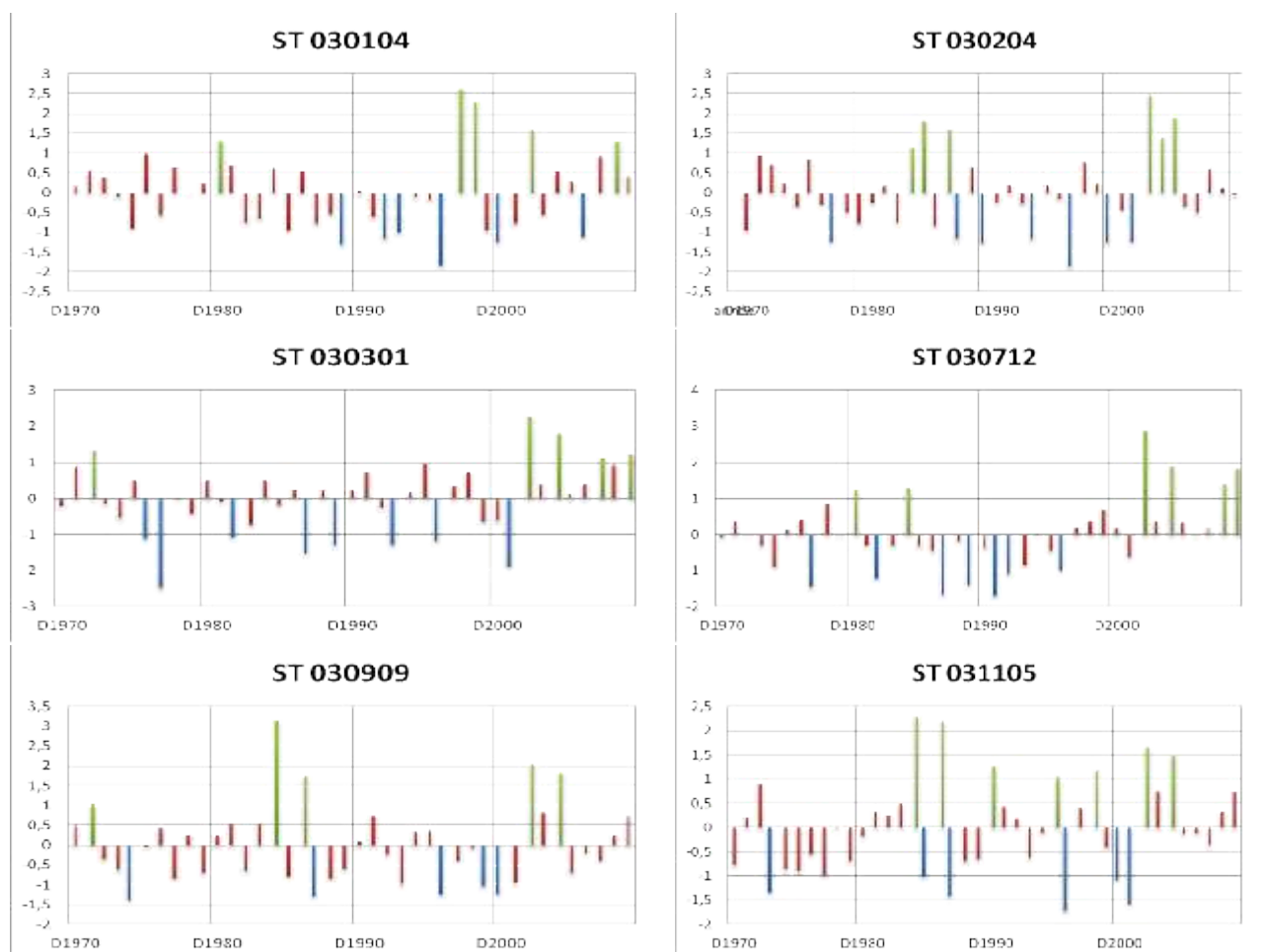
### Introduction

Dans ce chapitre, nous avons calculé le SPI pour déterminer les périodes sèches et humides, après nous avons appliqué l'ACP sur les moyennes du SPI annuel pour étudier la régionalisation de la sécheresse dans la zone d'étude.

#### 1. Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

##### 1.1. Répartition temporelle des épisodes sèches et humides sur la période étudiée

Nous avons calculé le SPI annuel pour toutes les stations pluviométriques de la zone d'étude (annexe 2). La variation du SPI est caractérisée par une alternance d'années humides, normales et sèches. Les graphes suivants (figure V.10) montrent l'évolution du SPI réparti sur l'ensemble de la zone d'étude.



**Figure V.10:** Evolution du SPI-12 sur la période d'étude de chacune des stations étudiées

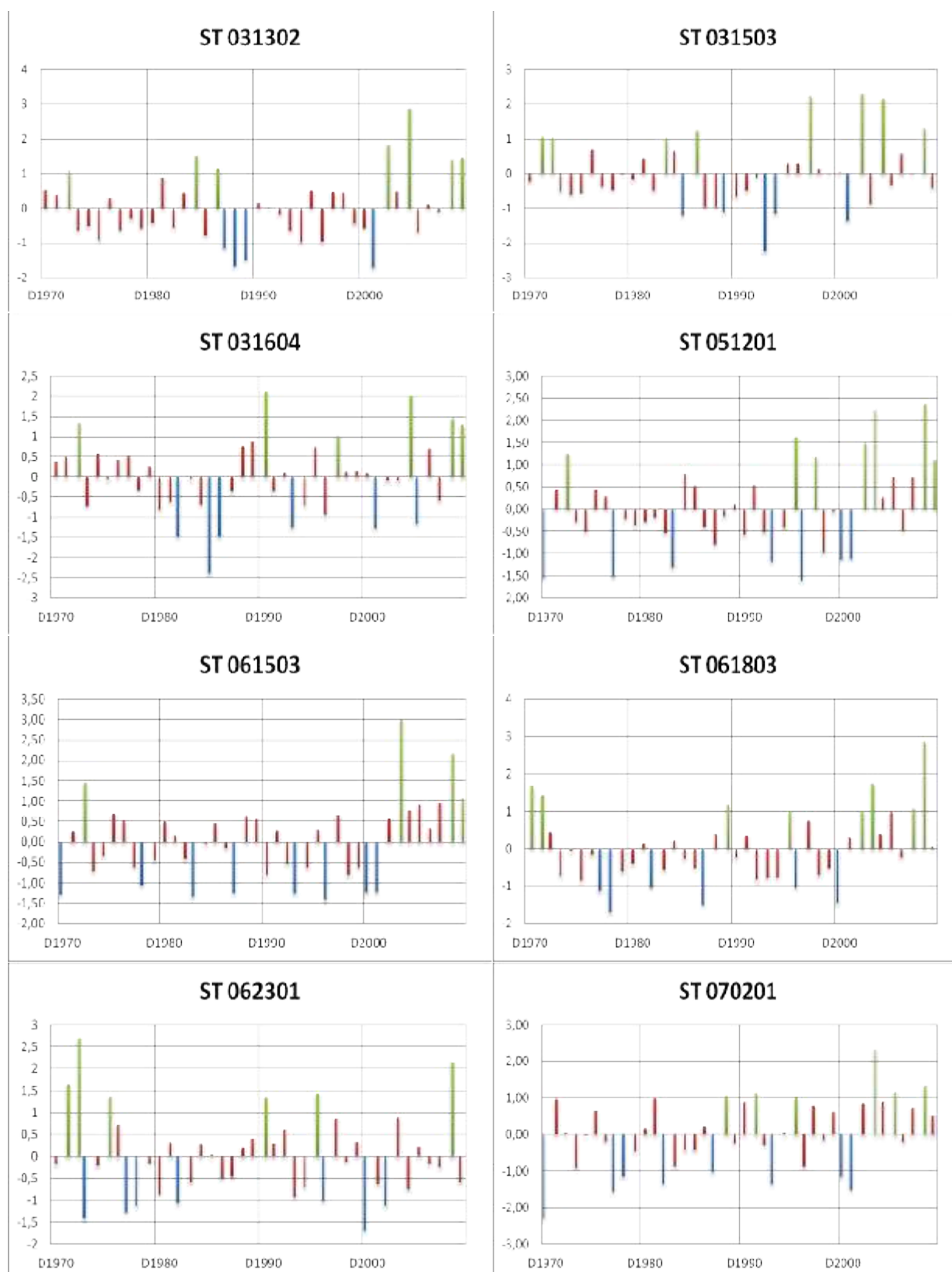


Figure V.10 (suite 1): Evolution du SPI-12 sur la période d'étude de chacune des stations étudiées

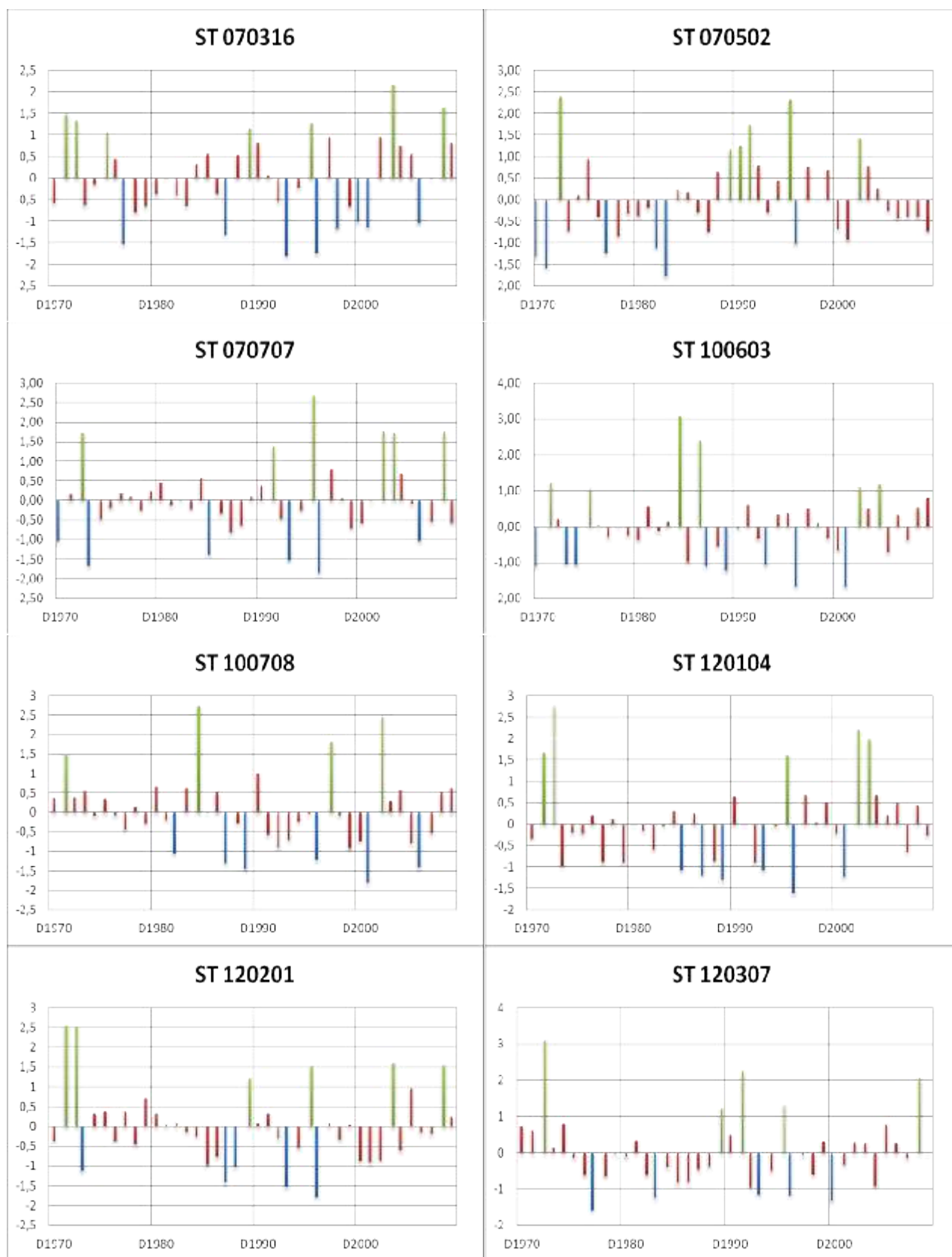


Figure V.10 (suite2): Evolution du SPI-12 sur la période d'étude de chacune des stations étudiées

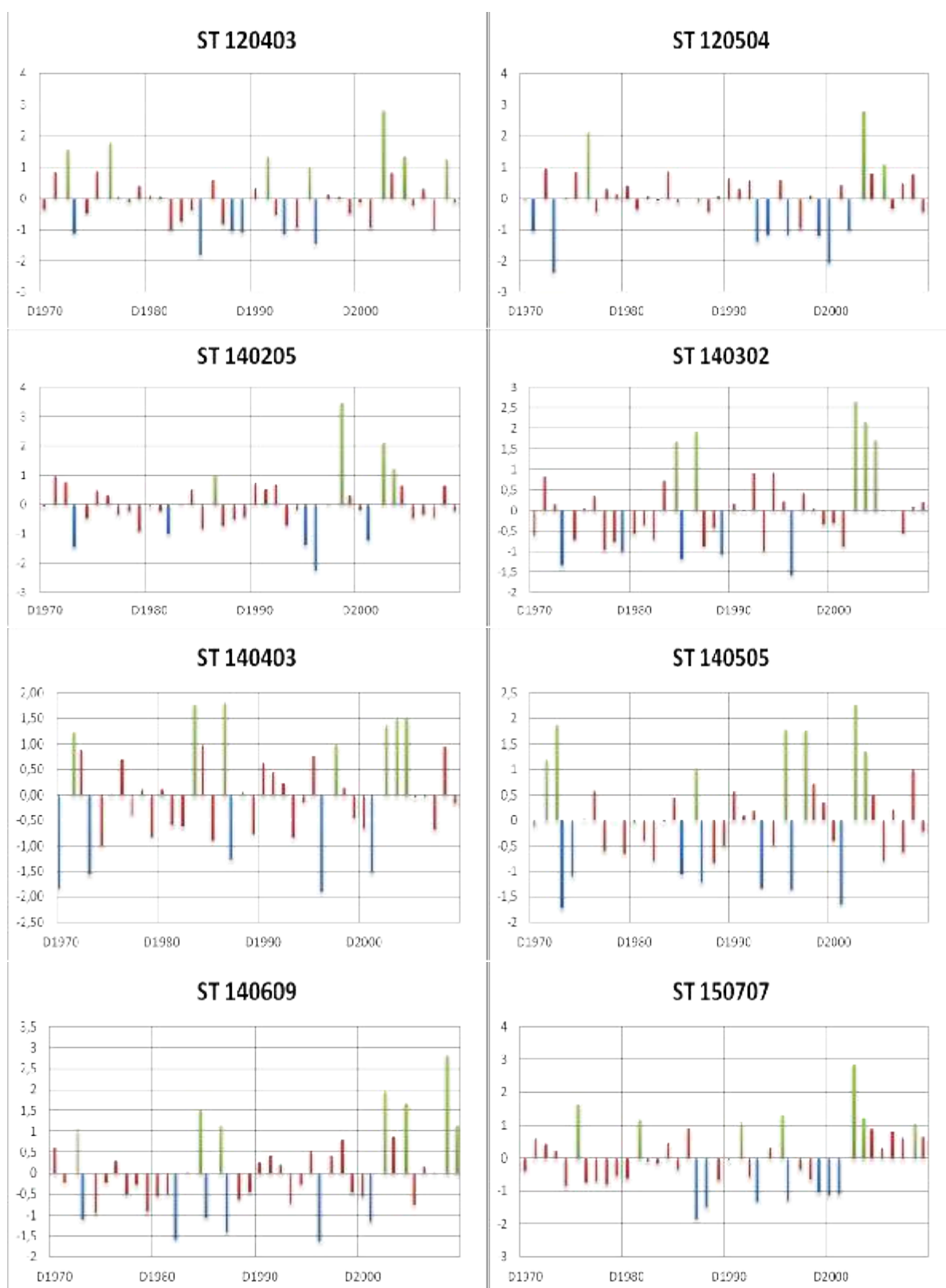


Figure V.10 (suite 3): Evolution du SPI-12 sur la période d'étude de chacune des stations étudiées

Tableau V. 9 : Répartition du SPI-12

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30		
1970										Jaune	Orange	Vert		Rouge		Orange	Orange	Orange										Jaune				
1971					Vert			Vert				Vert	Vert		Vert	Jaune		Vert	Vert	Vert	Vert				Orange			Vert	Vert			
1972			Vert					Vert	Vert	Vert	Vert		Vert		Vert	Vert	Vert				Vert	Vert	Vert	Vert					Vert	Vert		
1973						Orange							Orange									Orange				Orange	Orange	Orange	Orange	Orange		
1974					Orange																								Orange			
1975												Vert			Vert			Vert													Vert	
1976			Orange																					Vert	Vert							
1977		Orange	Rouge	Orange						Jaune		Orange	Orange	Orange	Jaune	Jaune	Orange						Jaune									
1978											Orange	Orange	Orange	Orange																		
1979																											Orange					
1980	Vert				Vert																											
1981																															Vert	
1982			Orange	Orange						Orange		Orange	Orange	Orange		Orange			Orange							Orange				Jaune		
1983	Vert							Vert		Orange	Orange				Jaune							Orange					Vert					
1984	Vert			Vert	Vert	Vert	Vert										Vert	Vert							Vert		Vert		Vert			
1985						Orange		Orange	Rouge							Orange				Orange			Jaune			Orange	Orange	Orange	Orange	Orange		
1986	Vert				Vert	Vert	Vert	Vert	Orange									Vert								Vert	Vert	Vert	Vert	Vert		
1987		Orange	Jaune	Jaune	Orange	Orange	Orange				Orange	Jaune		Orange	Orange			Orange	Orange	Orange	Orange	Orange						Orange	Orange	Orange	Jaune	
1988									Jaune					Vert								Orange										Jaune
1989	Orange	Orange	Orange	Orange								Vert			Vert	Vert		Orange	Orange	Orange	Orange	Vert	Vert	Orange			Orange				Jaune	

Légende :



Très Humide



Humide



Modérément Humide



Normale



Modérément Sèche



Sèche



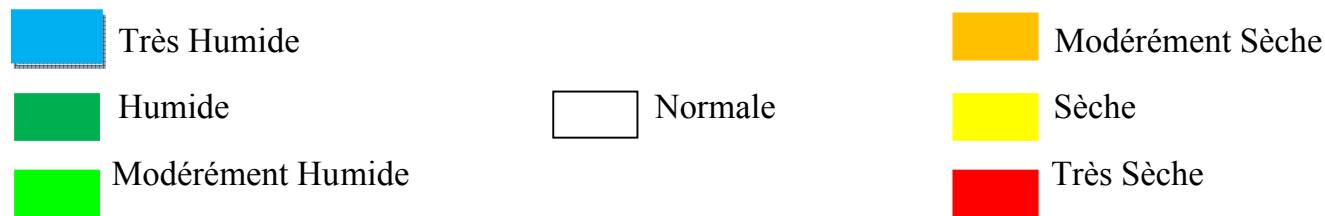
Très Sèche



Tableau V.9 (Suite) : Répartition du SPI-12

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	
1990						Humide			Très Humide				Humide			Humide															
1991				Sèche										Humide		Humide	Humide					Très Humide	Humide							Humide	
1992	Modérément Sèche			Modérément Sèche																											
1993	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche					Très Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche			Modérément Sèche	Sèche		Sèche	Modérément Sèche		Modérément Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche			Modérément Sèche		Modérément Sèche		
1994								Modérément Sèche																	Modérément Sèche						
1995						Humide				Humide		Humide	Humide	Humide	Humide	Très Humide	Très Humide				Humide	Humide	Humide	Humide		Modérément Sèche		Humide		Humide	
1996	Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Sèche				Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche			Modérément Sèche	Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Très Sèche	Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Sèche	Modérément Sèche
1997	Très Humide								Très Humide	Humide	Humide									Humide									Humide	Humide	
1998	Très Humide					Humide										Modérément Sèche													Très Humide		
1999		Modérément Sèche																								Modérément Sèche					Modérément Sèche
2000	Modérément Sèche				Modérément Sèche	Modérément Sèche				Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche							Modérément Sèche			Très Sèche			Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche
2001		Modérément Sèche	Sèche			Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche				Sèche	Sèche	Modérément Sèche				Modérément Sèche	Sèche	Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche	Modérément Sèche
2002	Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Humide	Humide	Très Humide		Humide		Humide	Modérément Sèche			Humide	Humide	Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide		Très Humide	Modérément Sèche	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Humide	Très Humide	Humide	Très Humide
2003		Humide									Très Humide	Humide		Très Humide	Très Humide		Humide	Humide		Humide	Humide			Très Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Humide	Très Humide	Humide	Très Humide
2004		Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide									Humide						Humide			Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
2005										Modérément Sèche				Humide												Humide					
2006	Modérément Sèche															Modérément Sèche		Modérément Sèche		Modérément Sèche											
2007			Humide									Humide																			
2008	Humide			Humide			Humide	Humide	Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Très Humide	Humide	Humide		Humide					Humide	Très Humide	Humide					Très Humide	Humide	
2009			Humide	Humide			Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide																		Humide	Humide

Légende :



Il apparait dans les tableaux V.9 et V.10 plus d'années normales 71,2%, les années humides représentent 15,2% et les années sèches représentent 16,2 % dont 0,6 % seulement représente une sécheresse extrême élevée, contre les années modérément sèche qui représentent 11,6 % et les années d'humidité modérée représentant 7,2 %.

**Tableau V.10 :** Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI-12) pour chaque station durant de la période d'étude

Stations	TH	H	MH	N	MS	S	TS
St 030104	5,1	2,6	5,1	74,4	12,8	2,6	0
St 030204	2,6	7,7	5,1	69,2	15,4	2,6	0
St 030301	2,6	2,6	7,7	69,2	12,8	5,1	2,6
St 030712	2,6	5,1	7,7	69,2	12,8	5,1	0
St 030909	5,1	5,1	2,6	76,9	12,8	0	0
St 031105	5,1	2,6	10,3	69,2	10,3	5,1	0
St 031302	2,6	5,1	10,3	74,4	<b>2,6</b>	7,7	0
St 031503	<b>7,7</b>	0	<b>12,8</b>	69,2	10,3	0	2,6
St 031604	5,1	0	10,3	71,8	12,8	0	2,6
St 051201	5,1	2,6	10,3	66,7	10,3	7,7	0
St 061503	5,1	0	5,1	71,8	<b>20,5</b>	0	0
St 061803	2,6	5,1	<b>12,8</b>	66,7	10,3	5,1	0
St 062301	5,1	2,6	7,7	69,2	15,4	2,6	0
St 070201	2,6	0	<b>12,8</b>	66,7	12,8	5,1	2,6
St 070316	2,6	2,6	<b>12,8</b>	64,1	12,8	7,7	0
St 070502	5,1	2,6	7,7	71,8	10,3	5,1	0
St 070707	2,6	<b>10,3</b>	2,6	71,8	7,7	7,7	0
St 100603	5,1	0	10,3	66,7	15,4	5,1	0
St 100708	5,1	5,1	<b>0</b>	76,9	12,8	2,6	0
St 120104	5,1	7,7	<b>0</b>	74,4	12,8	2,6	0
St 120201	5,1	7,7	2,6	74,4	7,7	5,1	0
St 120307	<b>7,7</b>	0,0	5,1	76,9	10,3	2,6	0
St 120403	2,6	5,1	10,3	69,2	12,8	2,6	0
St 120504	5,1	0	2,6	74,4	15,4	0	<b>5,1</b>
St 140205	5,1	0	5,1	79,5	10,3	0	2,6
St 140302	5,1	7,7	<b>0</b>	76,9	10,3	2,6	0
St 140403	<b>0</b>	<b>10,3</b>	7,7	71,8	<b>2,6</b>	<b>10,3</b>	0
St 140505	2,6	7,7	7,7	66,7	12,8	5,1	0
St 140609	2,6	7,7	7,7	69,2	10,3	5,1	0
St 150707	2,6	2,6	<b>12,8</b>	66,7	12,8	5,1	0
Moy	<b>4,1</b>	<b>3,9</b>	<b>7,2</b>	<b>71,2</b>	<b>11,6</b>	<b>3,9</b>	<b>0,6</b>

D'après l'évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations (figure V.10), on remarque que la zone d'étude est caractérisée par une alternance des classes humides, sèches et normales.

### 1.1.1. Classe humide

Elle représente le nombre d'années où le SPI observé est supérieur ou égal à +1, lesquelles années sont illustrées dans la figure V.10 par la couleur verte, montrant les classes suivantes:

- a) **Classe très humide (TH)** : la fréquence dans l'ensemble des stations ne dépasse pas les 8% observés dans deux stations situées au sud-est du côtier Annaba et sur le nord des monts de Tébessa (st 031503 et st 120307) et une fréquence nulle dans la station situé à la Plaine de Guelma (st 140403).
- b) **Classe humide (H)** : une fréquence maximale de 10,3 %, enregistrée dans deux stations situées aux Hauts Plateaux constantinois (st 070707) et à la Plaine de Guelma (st 140403).
- c) **Classe Modérément Humide (MH)** : une fréquence maximale de 12,8 % , enregistrée dans les stations situées, aux au sud-est du côtier de Annaba (st 031503), sur le nord des monts des Nementcha (st 061803), sur les Hauts Plateaux constantinois (070201, st 070316) et sur le sud du côtier de Bejaia (st 150707) et une fréquence nulle est enregistrée dans trois stations situées au sud-est du côtier de Jijel (st 100708), sur le nord des montagnes de Medjerda (st 120104) et sur la plaine de Guelma (140403).

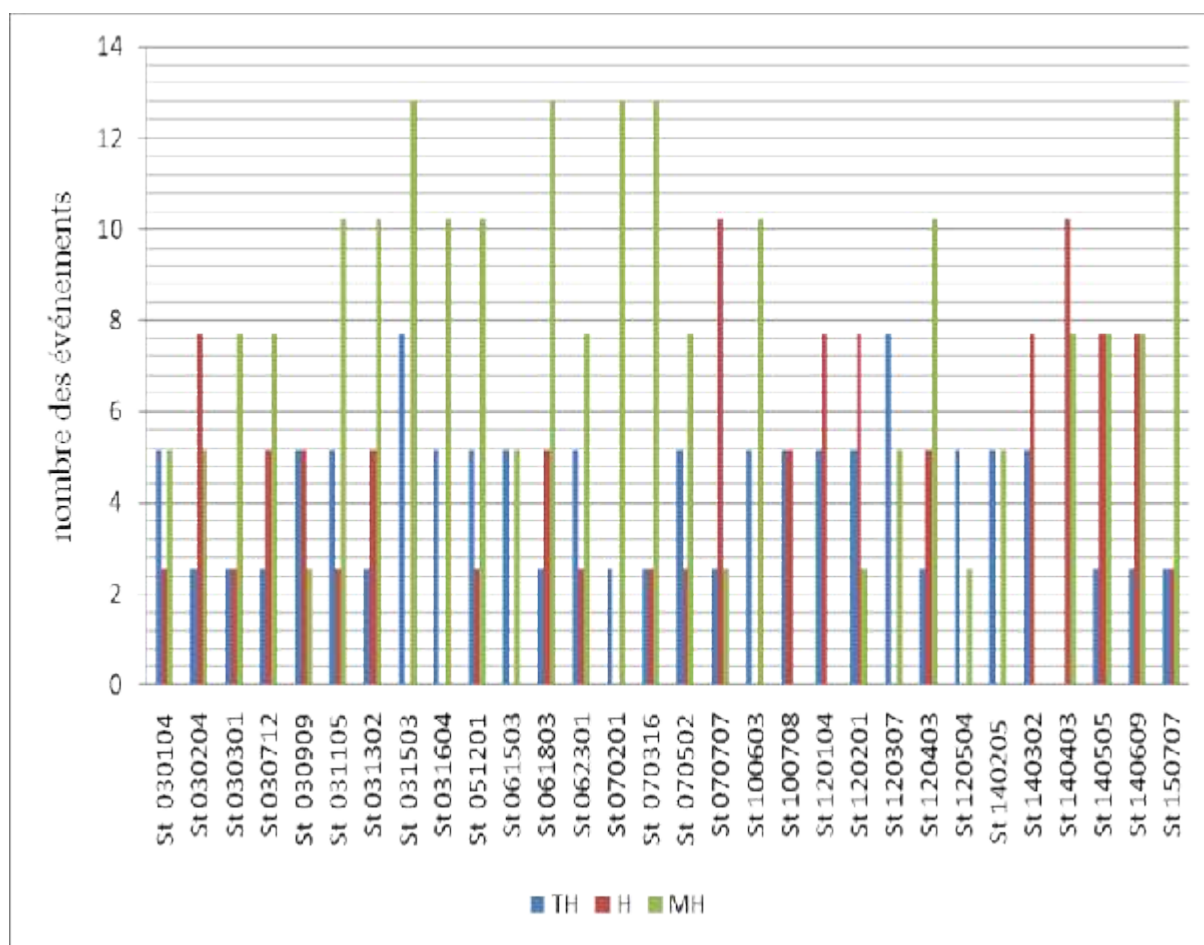


Figure V.11 : Histogramme des classes humides du SPI-12 pour chaque station durant la période d'étude

### 1.1.2. Classe sèche

Elle représente le nombre d'années où le SPI observé est inférieur ou égal à (-1), lesquelles années sont illustrées dans la figure V.10 par la couleur bleue et comportent les classes suivantes:

- Classe très sèche(TS) :** sa fréquence est très faible ; 2,6 % , elle est observée dans les stations suivantes: st 030301 du côtier de Jijel , st 031503 de sud-est du côtier de Annaba , st 031604 de la plaine de Guelma , st 070201 des Hauts Plateaux constantinois et st 140205 du sud –ouest de la plaine de Guelma et une fréquence maximale de 5.1% est enregistrée à la station nord des monts de Tébessa.

- b) **Classe sèche (S)** : on remarque que les fréquences varient entre 7%-2,6% sur l'ensemble des stations. L'apparition la plus importante est enregistrée à la station st 140403 de la plaine de Guelma avec une fréquence de 10,3 % et une fréquence nulle observée dans les stations suivantes : st 030309 du côtier de Skikda ,st 031503 du sud-est du côtier de Annaba, st 031604 de la plaine de Tarf, 061503 du nord de chott Melrhir, st 120504 du nord des monts de Tébessa et st 140205 du sud-ouest de la plaine de Guelma.
- c) **Classe Modérément Sèche (MS)**: leur maximum d'appariation est de 20,5 % observée dans la station nord de chott Melrhir (st 061503) et une fréquence faible des deux stations : de l'ouest de côtier de Annaba (st 031303) et de la plaine de Guelma. Pour le reste des stations, on a observé une fréquence moyenne de 11%.

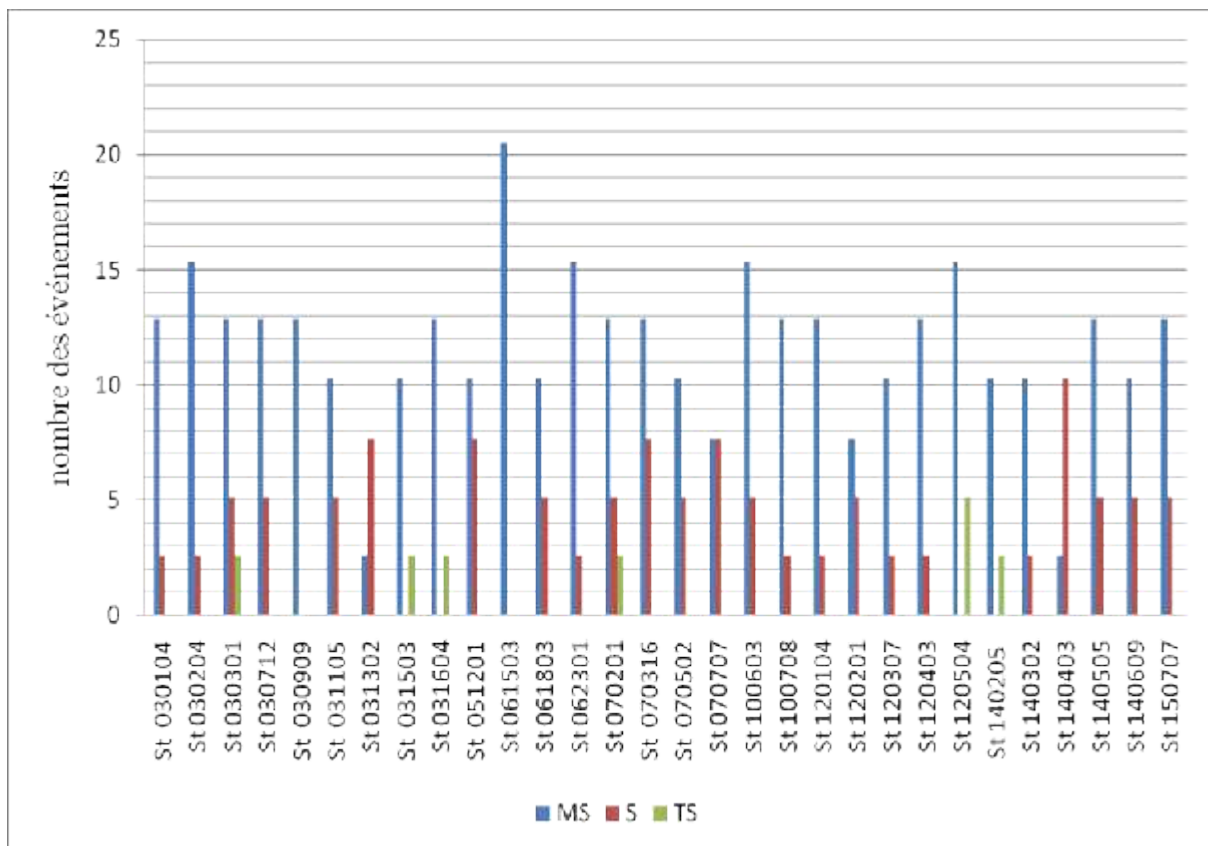
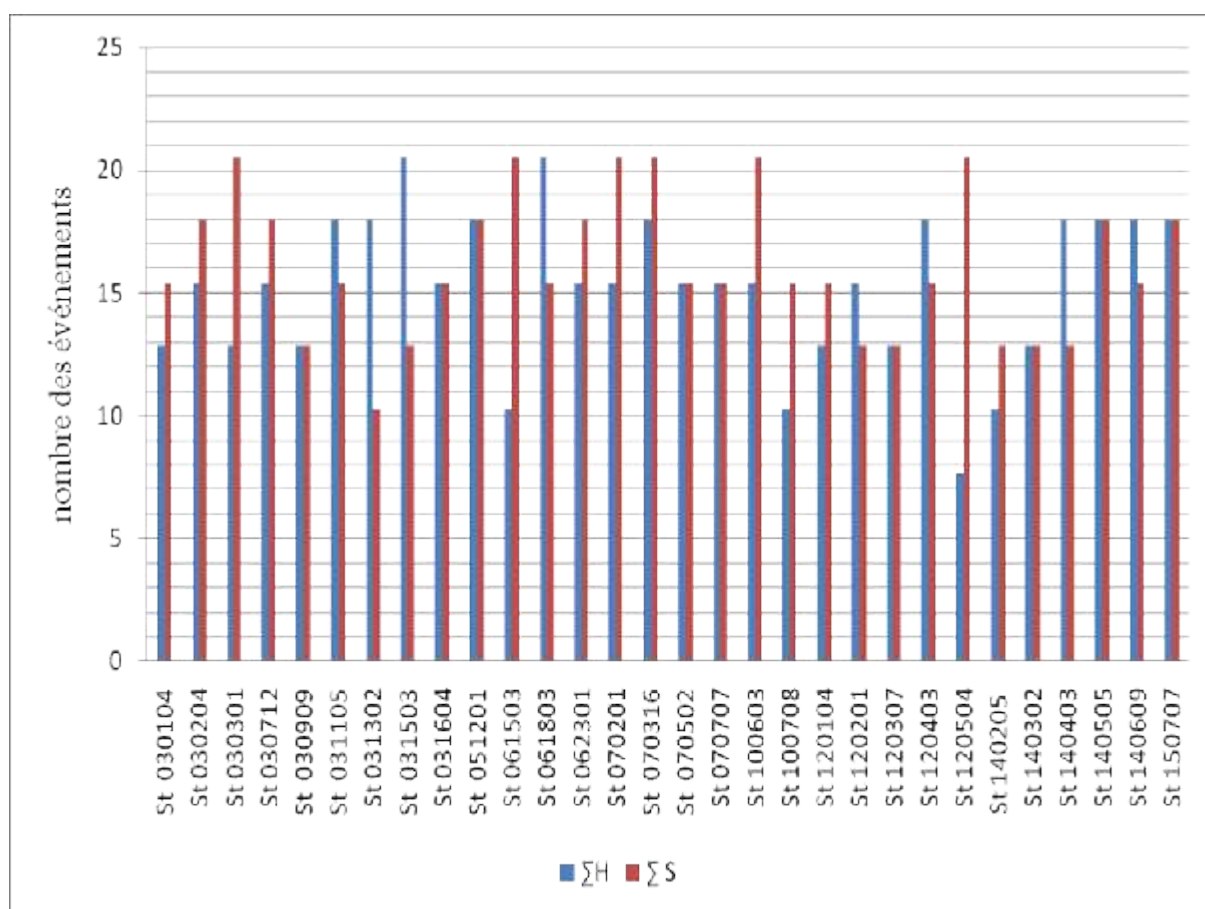


Figure V.12 : Histogramme des classes sèches du SPI-12 pour chaque station durant la période d'étude

### 1.1.3. Classes humides et sèches

Dans la figure V.13, si on compare les années humides et les années sèches pour chaque station, on remarque ce que suit :

- \_ 08 stations ont subi des années humides plus que des années sèches.
- \_ 13 stations ont subi plus des années sèches que des années humides.
- \_ 09 stations ont subi les mêmes nombres d'années sèches et d'année humides.



$\Sigma H$ : total épisodes Humide;  $\Sigma S$ : total épisodes Sèches.

**Figure V.13** : Histogramme de la somme des classes humides et sèches du SPI-12 pour chaque station durant la période d'étude

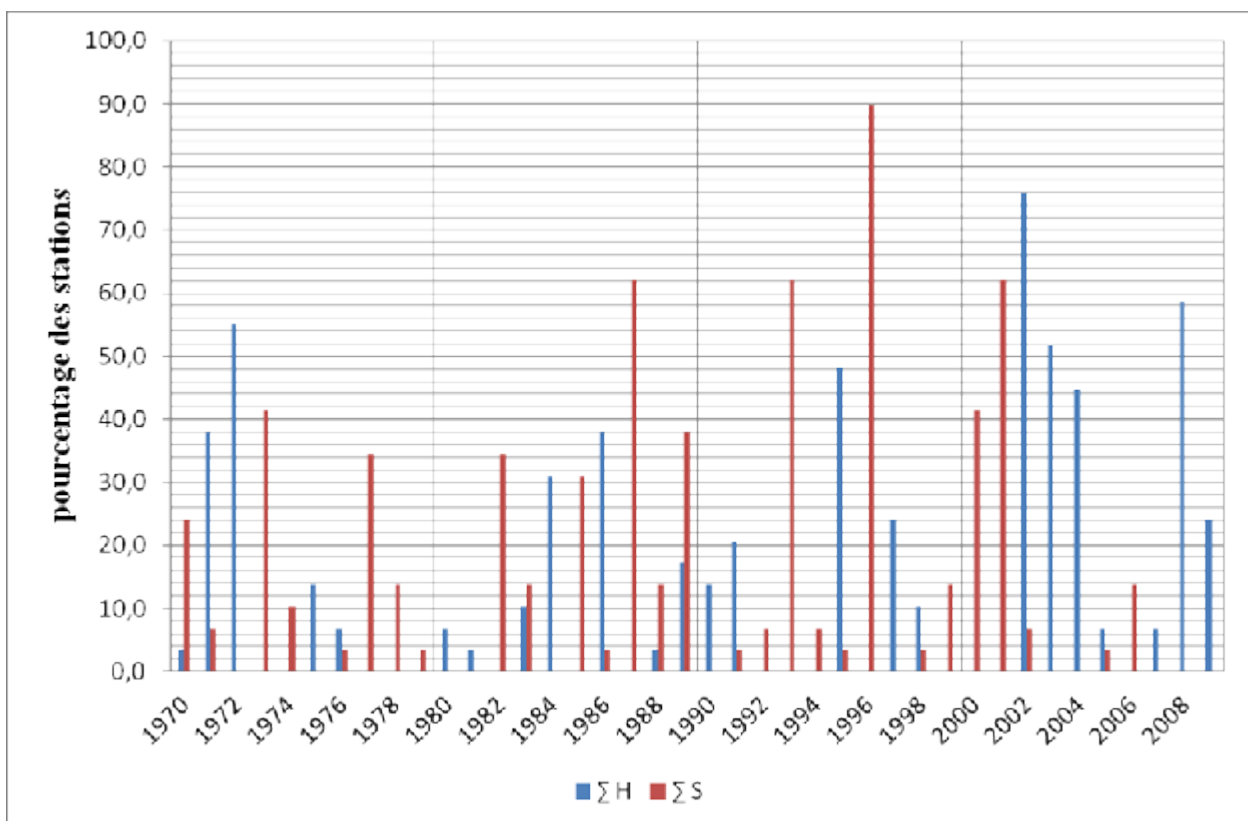


Figure V.14: Pourcentage de stations indiquant des valeurs du SPI-12  $\leq (-1)$  et  $\geq (1)$

L'analyse de la figure V.14 permet de mettre en évidence :

- **Pendant la décennie 1970** : six années normales contiennent des classes sèches: 1970, 1973,1974, 1977,1978, 1979 et quatre années normales contiennent des classes humides : 1971, 1972, 1975, 1976.
- **Pendant la décennie 1980** : six années normales contiennent des classes sèches : 1983, 1985, 1987, 1988, 1989 et quatre années normales contiennent des classes humides : 1980, 1981,1984 ,1986
- **Pendant la décennie 1990** : cinq années normales contiennent des classes sèches : 1992, 1993, 1994, 1996, 1999 et cinq années normales contiennent des classes humides: 1990, 1991, 1995, 1997,1998.
- **Pendant la décennie 2000** : trois années normales contiennent des classes sèches : 2000, 2001, 2006 et sept années normales contiennent des classes humides : 2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008,2009.



En résumé, l'évolution de l'indice SPI-annuel entre 1970 et 2009 laisse entrevoir, d'une manière générale, une tendance à la hausse de la pluviométrie couvrant la décennie 2000 et une tendance à la baisse de la pluviométrie couvrant les décennies 1970 et 1980. Pendant la décennie 1990, la tendance pluviométrique est la même pour les années sèches et les années humides. Alors, on constate que pendant les décennies 1970 et 1990 un nombre très élevé de stations est affecté par la sécheresse, ce qui concorde avec les résultats de Khoualdia et al (2014) pour la même région, Gargouri et al (2010) pour la Tunisie, Magno et al (2007) pour l'Italie, Katsibani et Mavrakis (2011) pour la Grèce et Ceglar et al (2008) pour la Slovénie.

### **1.2. Répartition temporelle et spatiale des périodes humides et sèches**

L'analyse de la figure 15 (voir ci-dessous) qui représente la répartition géographique des classes du SPI annuel dans la zone d'étude, de chaque station et pour chaque année de la période retenue, montre les observations remarquables suivantes :

#### **1.2.1. Années représentant l'absence de la sécheresse sur la totalité de la zone d'étude**

- **Les années considérées comme humides : 1972** (16 stations humides), **2003** (15 stations humides) et **2008** (17 stations humides).
- **Les années considérées comme normales avec quelques stations humides :** **1975** (04 stations humides), **1980**(02 stations humides), **1981**(01 station humide), **1984** (09 stations humides), **1986** (11 stations humides), **1990** (04 stations humides), **1995** (14 stations humides), **1997**(07 stations humides), **2004**(10 stations humides), **2007**(02 stations humides), **2009**(07 stations humides).



### 1.2.2. Années représentant la rareté de la sécheresse sur la totalité de la zone d'étude

- **L'année considérée comme même humide : 2002** (17 stations humides, 02 stations sèches).
- **Les années considérées comme normales et contenant des stations humides** : **1971** (11 stations humides, 02 stations sèches), **1976** (02 stations humides, 01 station sèche), **1983** (03 stations humides, 04 stations sèches), **1988** (01 station humide, 04 stations sèches), **1991** (06 stations humides, 01 station sèche), **1998** (03 stations humides, 01 station sèche), **2005** (02 stations humides, 01 station sèche).
- **Les années considérées comme normales et ne contenant pas des stations humides** : **1974** (03 stations sèches), **1978** (04 stations sèches), **1979** (01 station sèche), **1992** (02 stations sèches), **1994** (02 stations sèches), **1999** (04 stations sèches), **2006** (04 stations sèches).

### 1.2.3. Années de la sécheresse persistante sur la totalité de la zone d'étude

- **Les années considérées comme normales et contenant des stations humides** : **1970** (07 stations sèches, 01 station humide) et **1989** (11 stations sèches, 05 stations humides).
- **Les années considérées comme normales et ne contenant pas des stations humides** : **1973** (12 stations sèches), **1977** (10 stations sèches), **1982** (10 stations sèches), **1985** (09 stations sèches), **2000** (12 stations sèches).
- **Les années sèches** : **1987** (18 stations sèches), **1993** (18 stations sèches), **1996** (26 stations sèches), **2001** (18 stations sèches)

La conclusion tirée à partir de la figure V.15 (voir ci-dessous) se résume dans le tableau suivant :

**Tableau V.11:** Années sèches et humides dans la zone d'étude

Années représentant l'absence de la sécheresse sur la totalité de la zone d'étude		Années représentant la sécheresse dans quelques stations dans la zone d'étude			
Années Humides	Années Normales avec des Stations Humides	Années Humides	Années Normales avec des Stations Humides	Année Normales sans Stations Humides	Années Sèches
- 1972 (16 Sts H)	- 1975 (04 Sts H) - 1980 (02 Sts H) - 1984 (09 Sts H) - 1986 (11 Sts H) - 1990 (04 Sts H) - 1995 (14 Sts H) - 1997 (07 Sts H) - 2004 (10 Sts H) - 2007 (02 Sts H) - 2009 (07 Sts H)	- 2002 (17 Sts H, 02 Sts S)	- 1970 (07 Sts S, 01 Sts H) - 1989 (11 Sts S, 05 Sts H)	- 1973 (12 Sts S) - 1977 (10 Sts S) - 1982 (10 Sts S) - 1985 (09 Sts S) - 2000 (12 Sts S)	- 1987 (18 Sts S) - 1993 (18 Sts S) - 1996 (26 Sts S) - 2001 (18 Sts S)

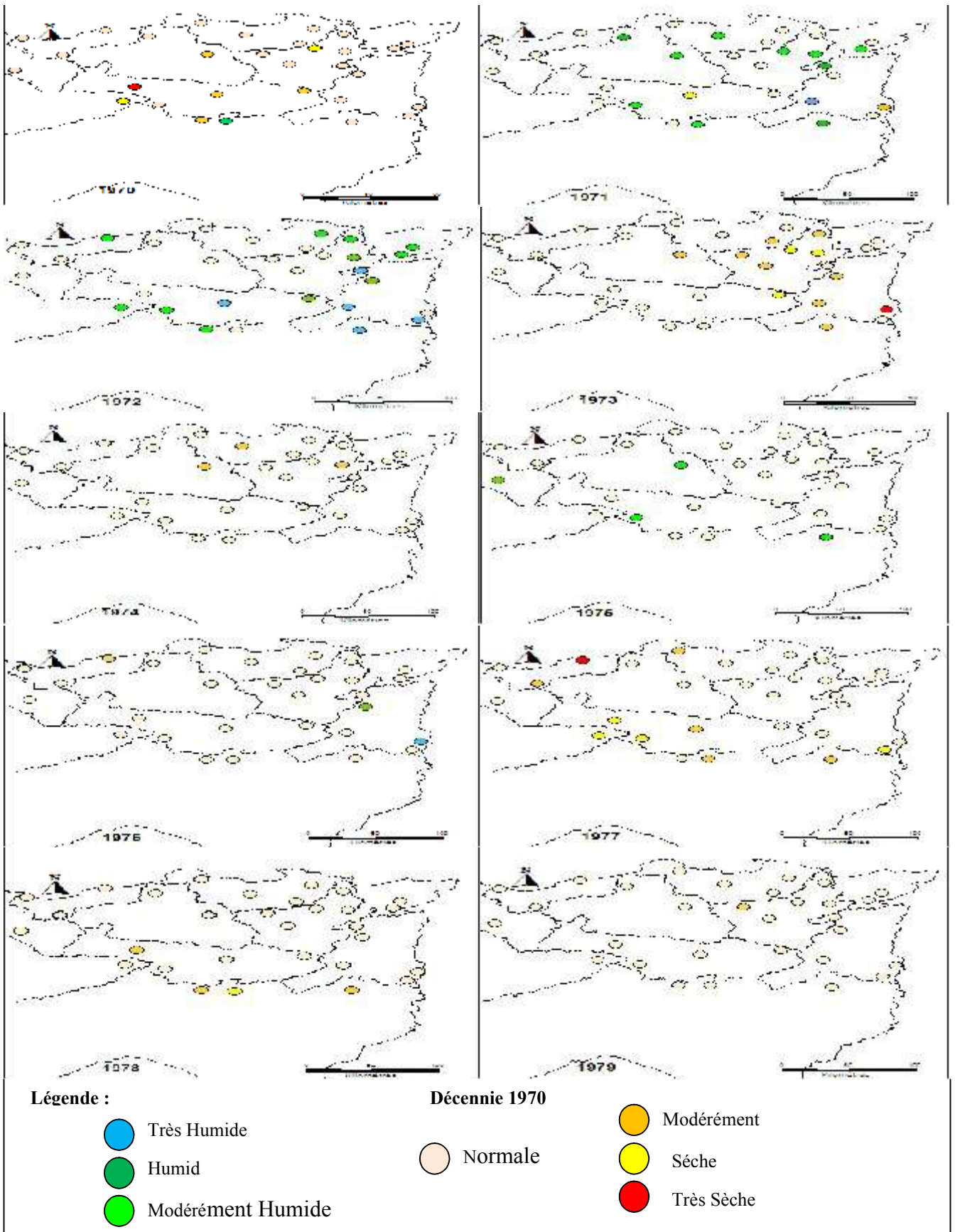


Figure V.15 : Répartition géographique des classes SPI-12

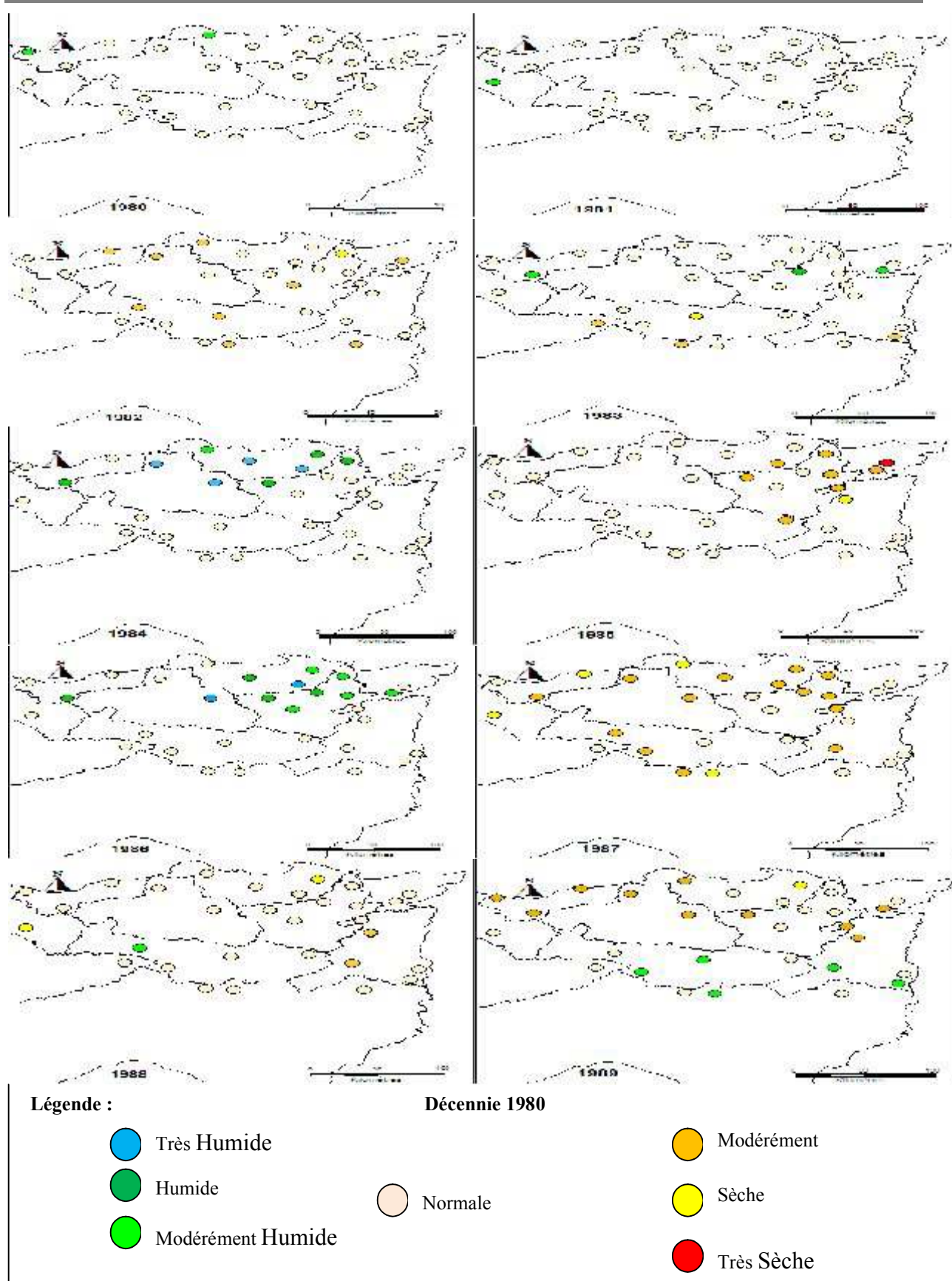


Figure V.15 (suite 1) : Répartition géographique des classes SPI-12



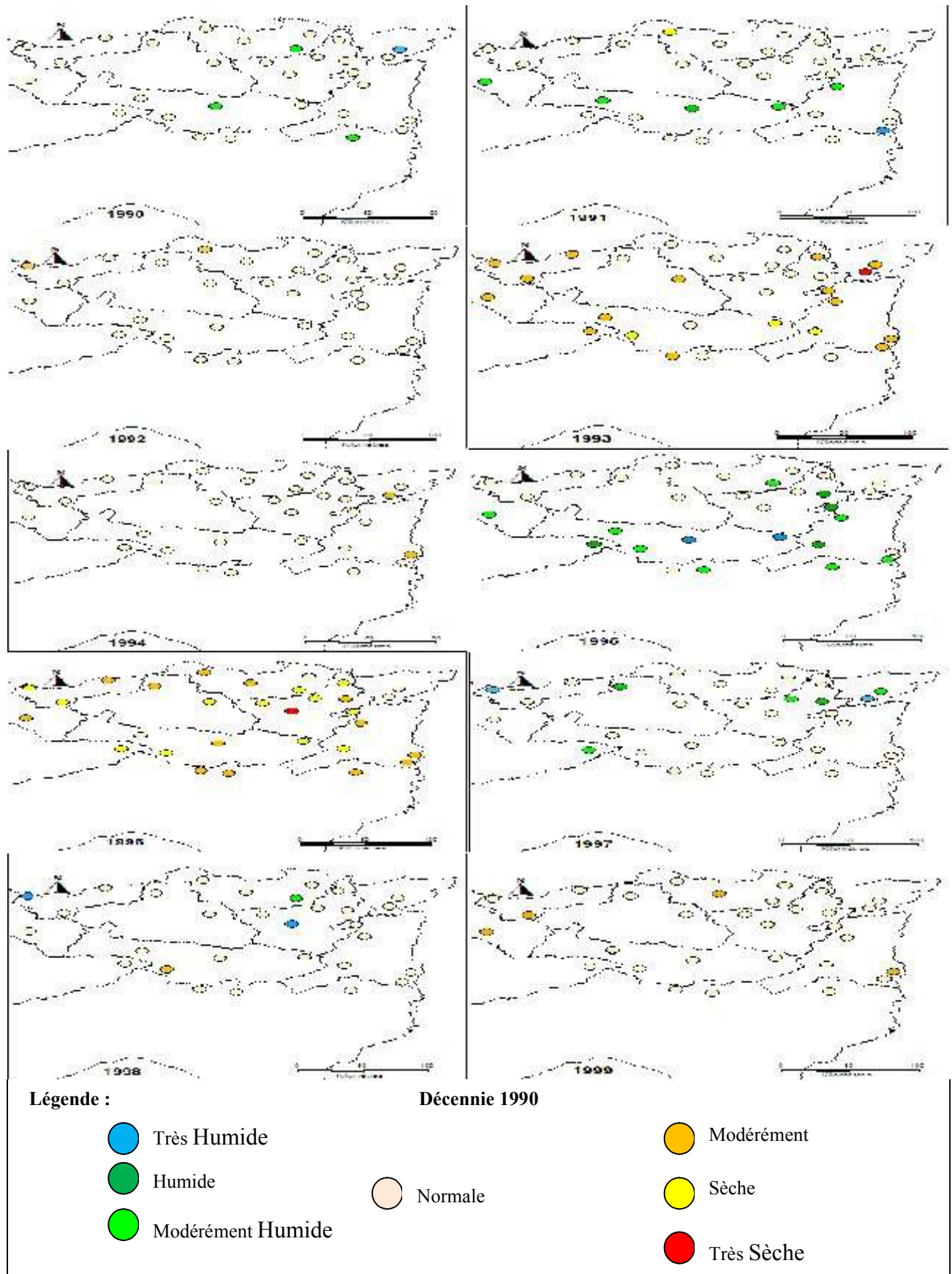


Figure V.15 (suite 2) : Répartition géographique des classes SPI-12

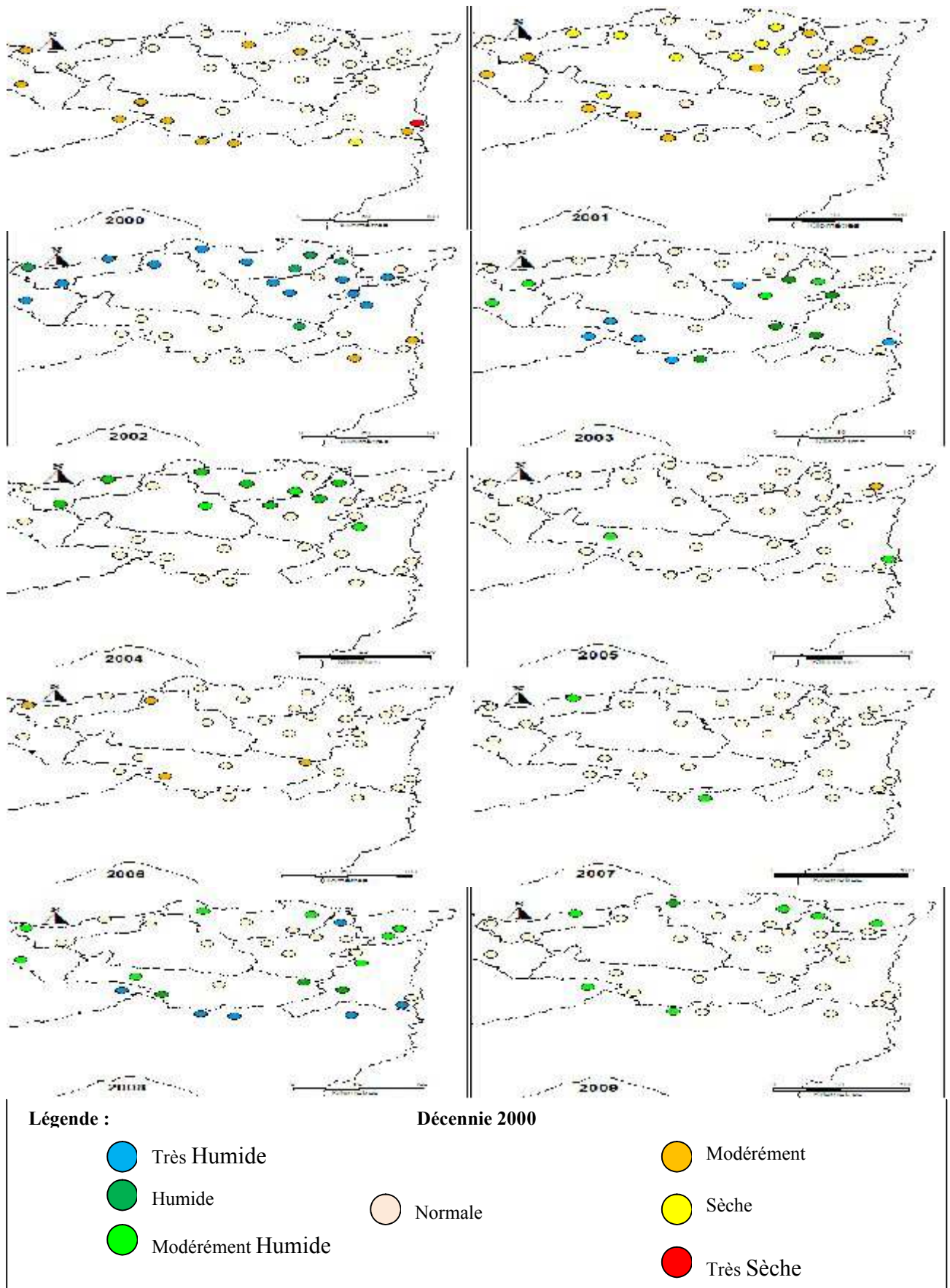
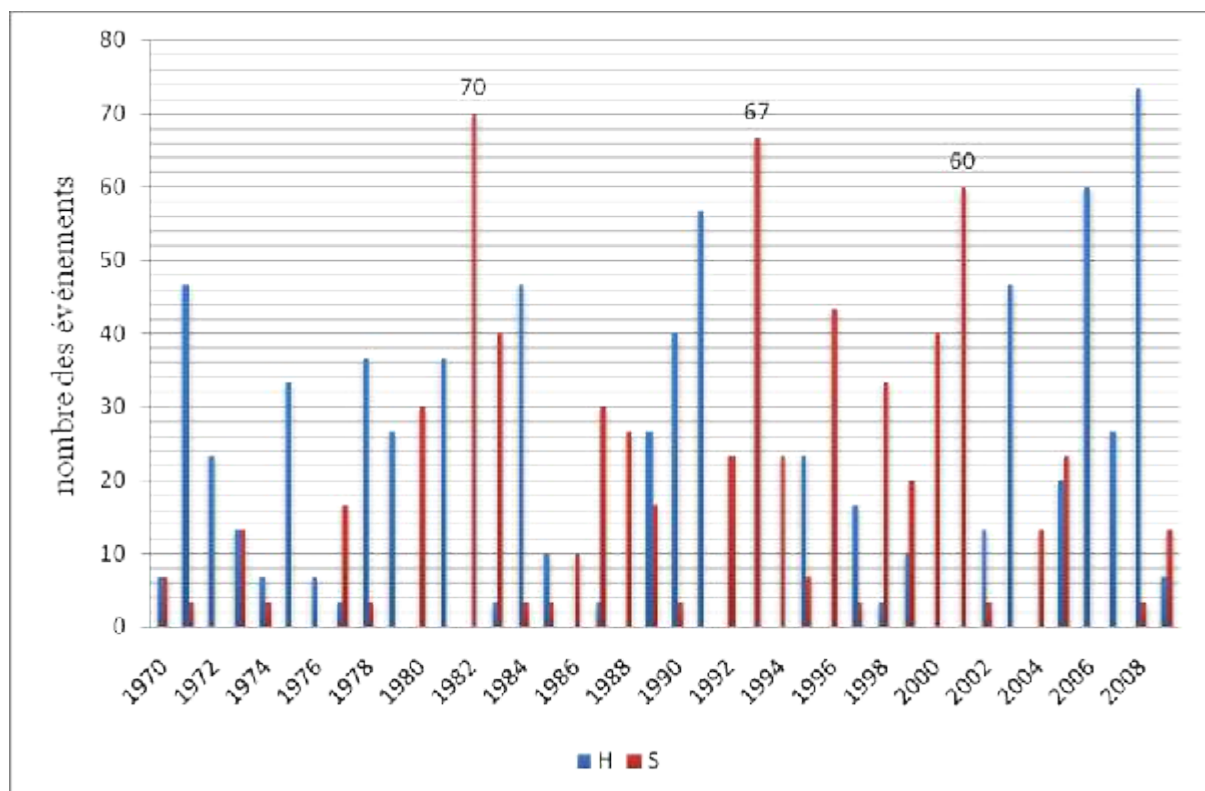


Figure V.15 (suite 3) : Répartition géographique des classes SPI-12

### 1.3. Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-3

On calcule l'Indice Standardisé des Précipitations à l'échelle de temps de trois mois, pour le cumul saisonnier MAM (printemps). Une interprétation des valeurs du SPI-3 trouvées pour la saison printemps de la période allant de 1970 à 2009 est donnée dans l'annexe 3, et cela en considérant qu'une saison est humide quand le  $SPI \geq 1$ , normale si le SPI est compris entre 1 et -1 et sèche si le  $SPI \leq -1$ .



**Figure V.16 :** Pourcentage de stations indiquant des valeurs du  $SPI-03 \leq (-1)$  et  $\geq (1)$

En analysant la figure V.16, on peut constater que les sécheresses printanières sont survenues dans la région pendant la période allant de 1977 à 2009 avec des fréquences d'observation les plus élevées (70 %, 67% et 60%) enregistrées pendant les années 1982, 1993 et 2001.

Les années d'apparition de ces sécheresses sont (1977, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987, 1988, 1992, 1993, 1994, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2004, 2005, 2009), ce qui concorde avec les résultats de Laska Merkoci et al (2012) pour l'Albanie.



## 2. Analyse en composantes principales

En vue d'étudier la régionalisation de la sécheresse dans la zone d'étude, une analyse en composantes principales (ACP) avec rotation Varimax a été appliquée sur les SPI annuel calculé pour la période (1970-2009) pour les 30 stations considérées. Cela a été fait par le logiciel XLstat.2013.2.

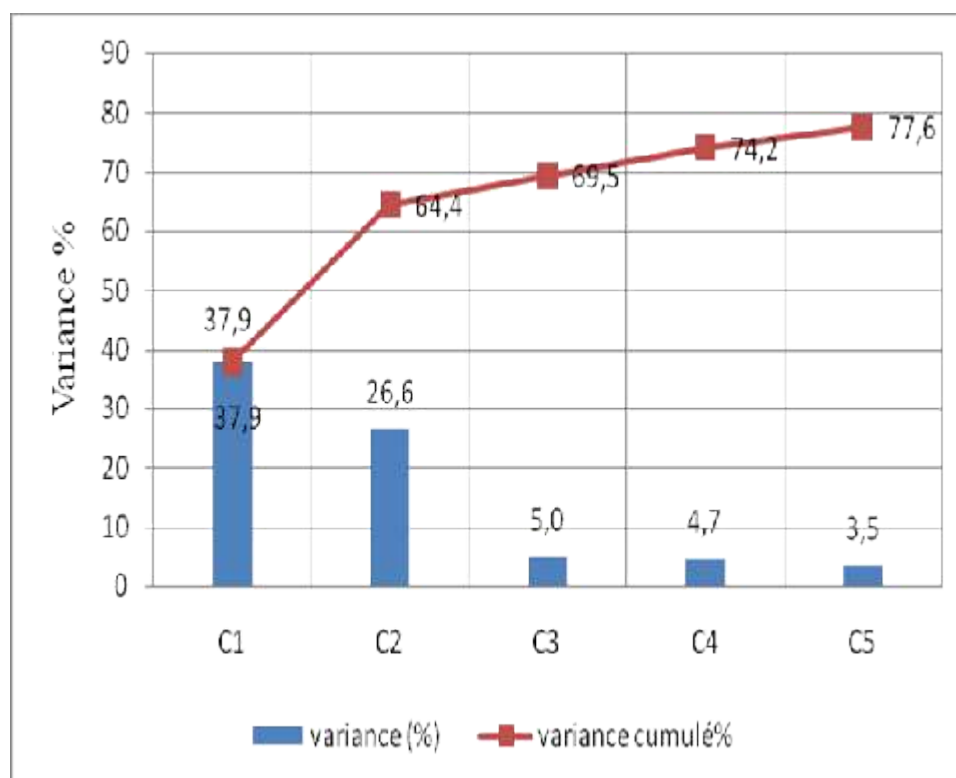
### 2.1. Interprétation des Résultats de l'A.C.P

L'analyse en composantes nous a permis de regrouper toutes les données requises du calcul de SPI et de faire ressortir l'essentiel de l'information. Les résultats sont donnés dans le tableau V.12 :

**Tableau V.12:** Pourcentage de la variance après rotation Varimax

N°	Variance (%)	Variance cumulé%	N°	Variance (%)	Variance cumulé%
C1	<b>37,9</b>	37,9	C16	0,7	96,6
C2	26,6	<b>64,4</b>	C17	0,6	97,2
C3	5,0	69,5	C18	0,5	97,7
C4	4,7	74,2	C19	0,4	98,2
C5	3,5	77,6	C20	0,4	98,5
C6	2,8	80,4	C21	0,3	98,9
C7	2,7	83,0	C22	0,3	99,1
C8	2,3	85,4	C23	0,2	99,3
C9	2,3	87,7	C24	0,2	99,5
C10	1,7	89,4	C25	0,1	99,7
C11	1,6	91,0	C26	0,1	99,8
C12	1,5	92,5	C27	0,1	99,9
C13	1,3	93,8	C28	0,1	99,9
C14	1,2	95,0	C29	0	100
C15	0,9	95,9	C30	0	100





**Figure V. 17:** Graphique des valeurs propres des stations

D'après les résultats obtenus du tableau V.12, la figure V.17 montre que les deux (02) premières composantes expliquent le maximum d'informations (**64,4%** de la variance totale), avec **37,9%** pour la première composante, **26,6 %** pour la seconde mais à partir de la troisième composante, l'information expliquée devient faible. Donc, les deux premières composantes seront retenues.

## 2.2. Projection des variables sur les axes factoriels

La projection des variables sur les axes factoriels choisis représentés par les composantes principales C1, C2 est donnée par le tableau V.13 suivant :

Tableau V.13: Projection des variables sur les principaux axes

Variable	Station pluviométrique correspondante	C1	C2
S1	30104	0,62	0,16
S2	30204	<b>0,86</b>	0,18
S3	30301	0,70	0,42
S4	30712	0,71	0,09
S5	30909	0,87	0,08
S6	31105	0,84	0,23
S7	31302	0,85	0,18
S8	31503	0,74	0,12
S9	31604	0,23	0,45
S10	51201	0,40	0,77
S11	61503	0,30	0,78
S12	61803	0,23	0,71
S13	62301	0,09	0,83
S14	70201	0,38	0,69
S15	70316	0,37	0,82
S16	70502	0,14	0,63
S17	70707	0,46	0,69
S18	100603	0,86	0,14
S19	100708	0,80	0,10
S20	120104	0,64	0,56

**Tableau V.13 (suite):** Projection des variables sur les principaux axes

<b>Variable</b>	<b>Station pluviométrique correspondante</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
<b>S21</b>	120201	0,10	0,81
<b>S22</b>	120307	<b>-0,02</b>	0,83
<b>S23</b>	120403	0,64	0,48
<b>S24</b>	120504	0,13	0,54
<b>S25</b>	140205	0,68	0,19
<b>S26</b>	140302	0,86	0,19
<b>S27</b>	140403	0,79	0,35
<b>S28</b>	140505	0,72	0,51
<b>S29</b>	140609	0,79	0,38
<b>S30</b>	150707	0,65	0,43

### 2.2.1. Projection des variables sur la première composante C1

La projection des variables sur la première composante principale donne des coefficients de corrélation qui varient entre -0,02 et 0,86. Le minimum de -0,02 est enregistré à la station S22 (120307) qui est située au Sud-est de la zone d'étude et les coefficients les plus forts sont enregistrés dans le Nord de la zone d'étude, on observe une séparation Nord-Sud (corrélation forte et faible). (Figure V.18).

### 2.2.2. Projection des variables sur la deuxième composante C2

Pour la deuxième composante principale, toutes les stations sont corrélées positivement avec cette composante avec un coefficient de corrélation variant entre 0,1 et 0,8. La variabilité du coefficient de corrélation y augmente selon une direction de l'ouest vers l'est. Ce résultat rejoint celui de Livada et Assimakopoulos (2007) pour la Grèce. (Figure V.19).

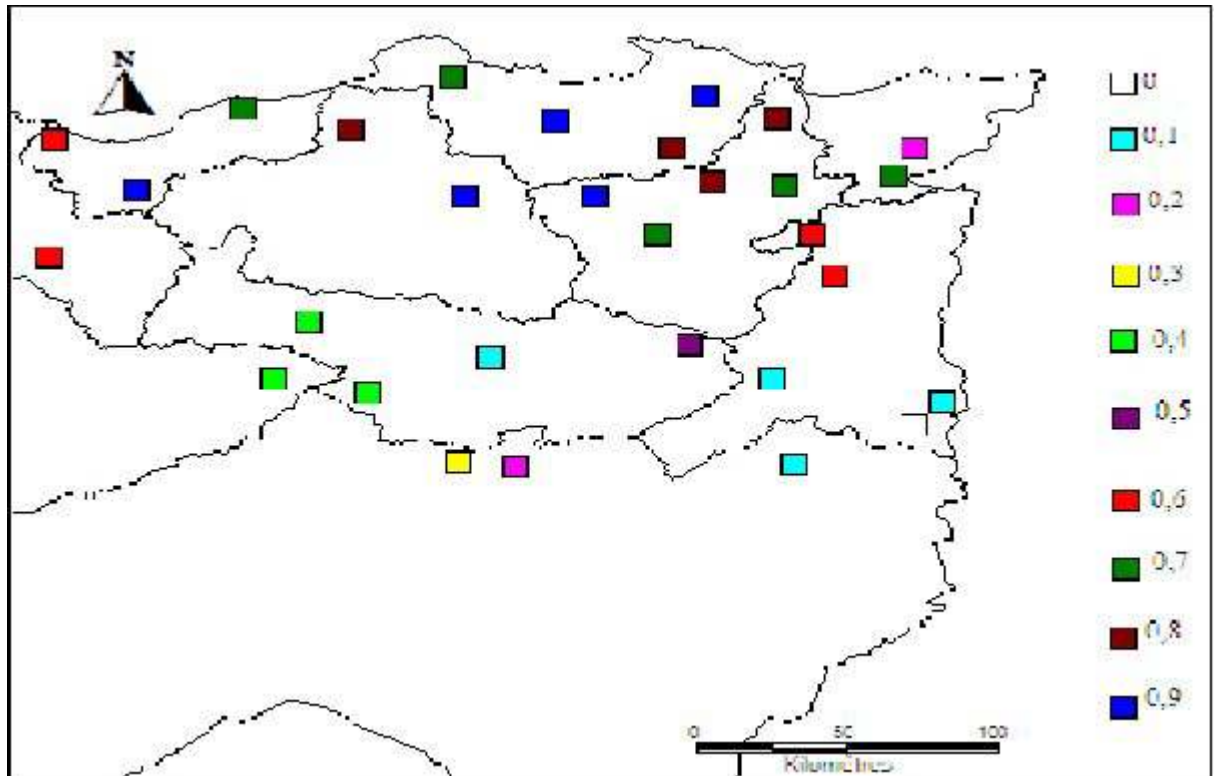


Figure V.18 : Projection sur la première composante principale

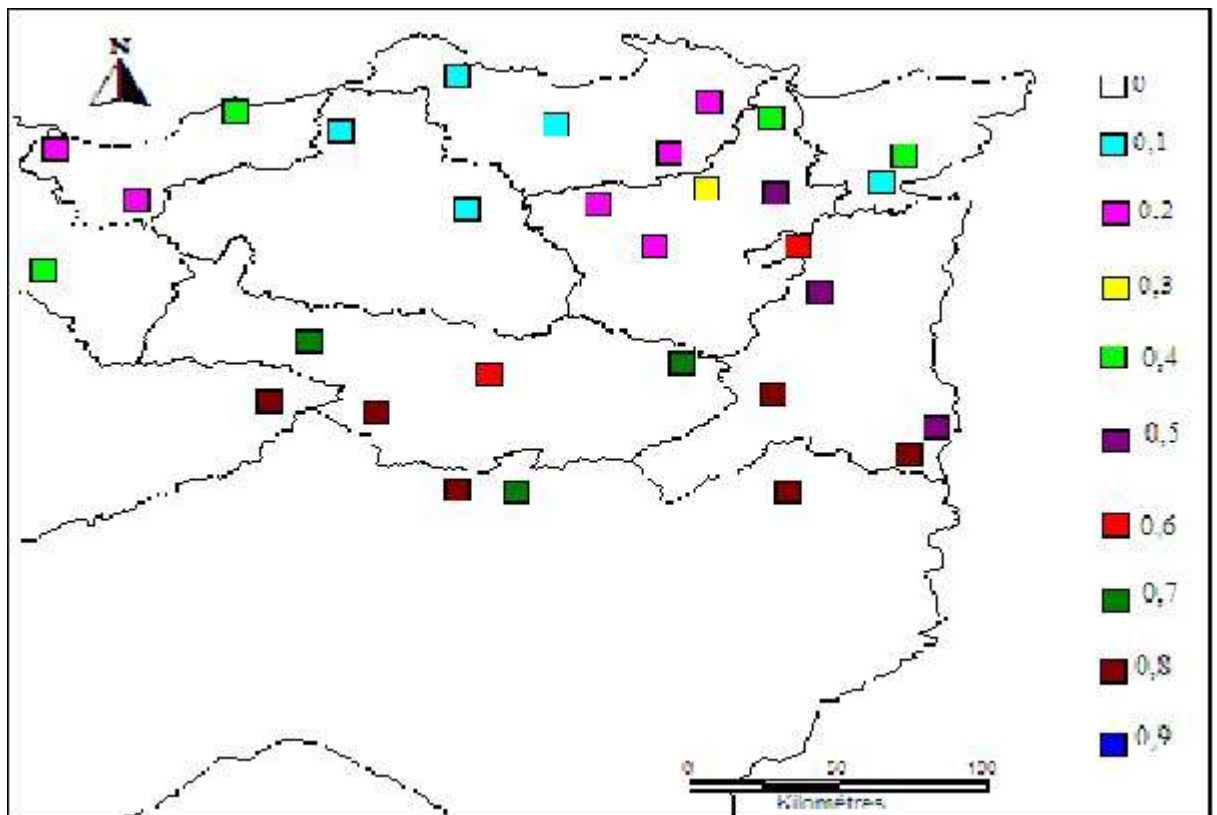
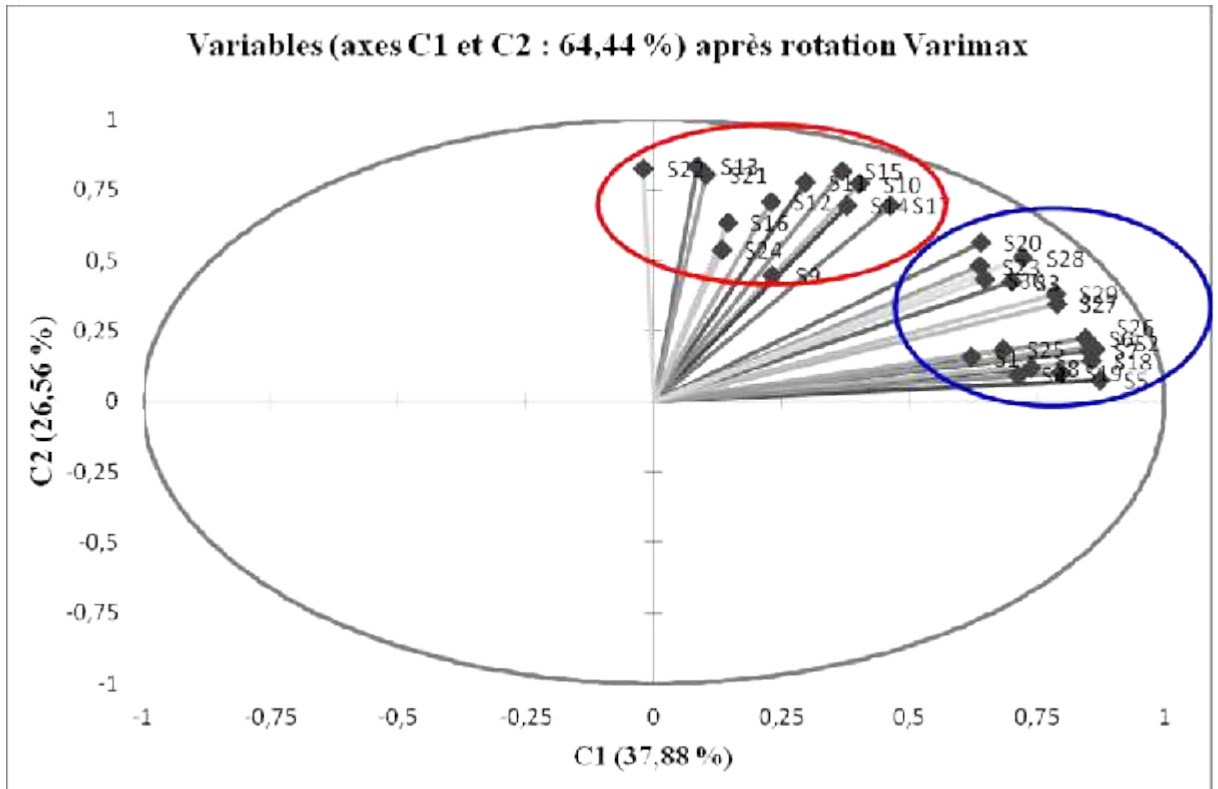


Figure V.19 : Projection sur la deuxième composante principale

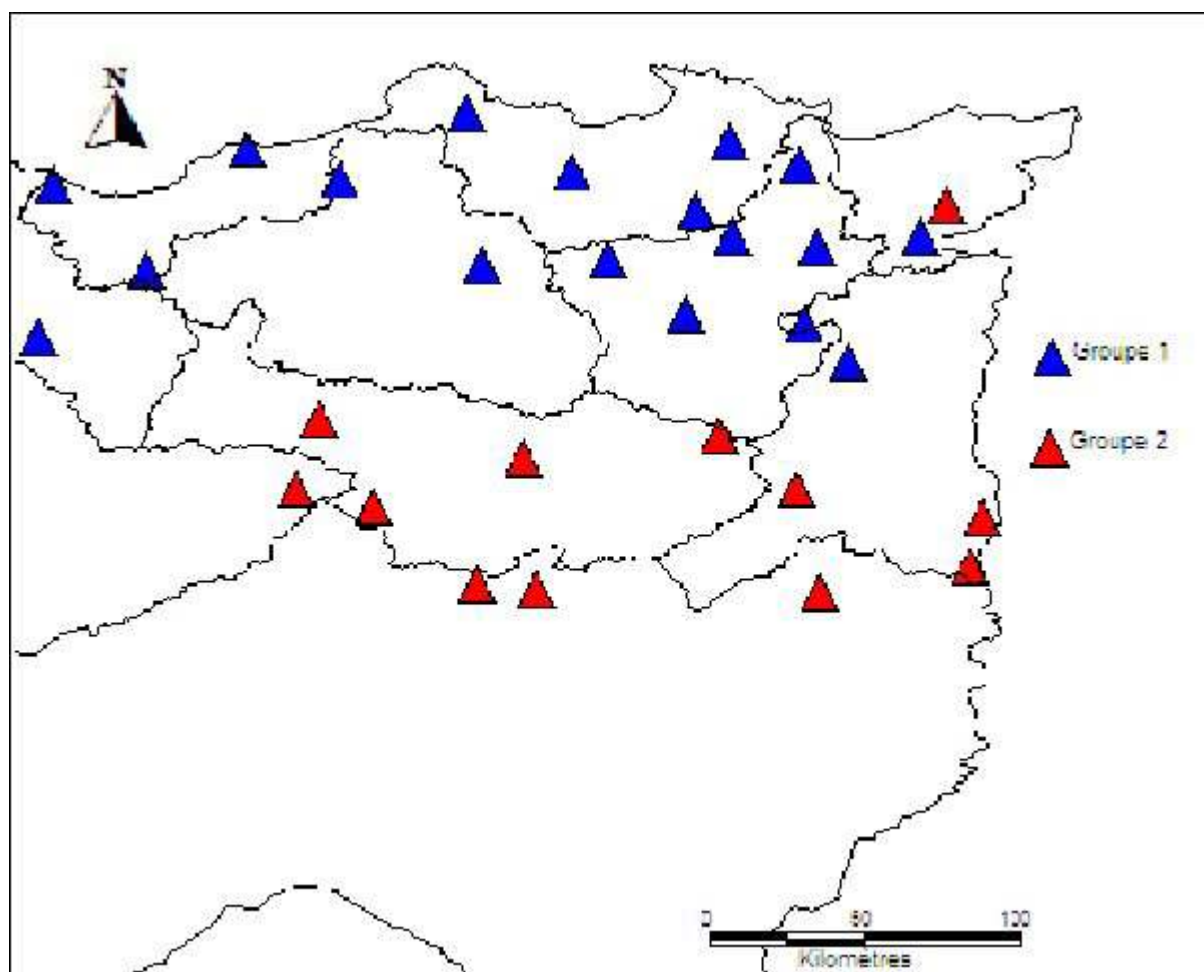


**Figure V.20 :** Projection des variables sur les plans (C1xC2)

Le cercle de corrélation (figure V. 20) met en évidence deux (02) groupes distincts dans la zone d'étude :

- 🚩 **1<sup>er</sup> groupe** : représenté par les stations situées au nord de la zone d'étude, sur le littorale et l'Atlas Tellien (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S18, S19, S20, S23, S25, S26, S27, S28, S29, S30).
- 🚩 **2<sup>ème</sup> groupe** : représenté par les stations situées au sud de la zone d'étude sur les monts de Belezma, les Hauts Plateaux du constantinois et les monts de Nementcha (S9, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S21, S22, S24).

Cette distinction de groupes peut également être illustrée dans la figure V.21 suivante :



**Figure V.21 :** Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)

D'après de ces résultats, on remarque qu'il y a une régionalisation des stations selon deux région ; la première région ; est constituée des stations situées dans la partie nord de la région d'étude caractérisée par un climat méditerranéen. Les stations de la deuxième région sont situées dans sa partie sud caractérisée par un climat semi-aride, confirmant ainsi les résultats obtenus par Benabdesselam et Amarchi (2013). Il est clair que la sécheresse s'est manifestée différemment du nord vers le sud. Ces résultats concordent avec les résultats de Topcu et al., (2010) pour la Turquie et les résultats de Loukas et Vasiliades (2004) pour la Grèce.

### 2.3. Interprétation des résultats sur les individus (années)

La représentation graphique des individus « années » sur les axes est donnée par la figure V.22.

Dans la figure, on remarque qu'il y a deux groupes homogènes d'années. Les années 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1981, 1988, 1989, 1990, 1991, 1995, 1997, 1999, 2003, 2005, 2007 et 2008 appartiennent au même groupe. L'apparition d'un déficit pluviométrique est senti à partir de 1970 et confirme les résultats obtenus par Loukas et Visiliades (2004) en Grèce et de Topcu et al (2010) en Turquie, et la poursuite de celui durant 80-90.

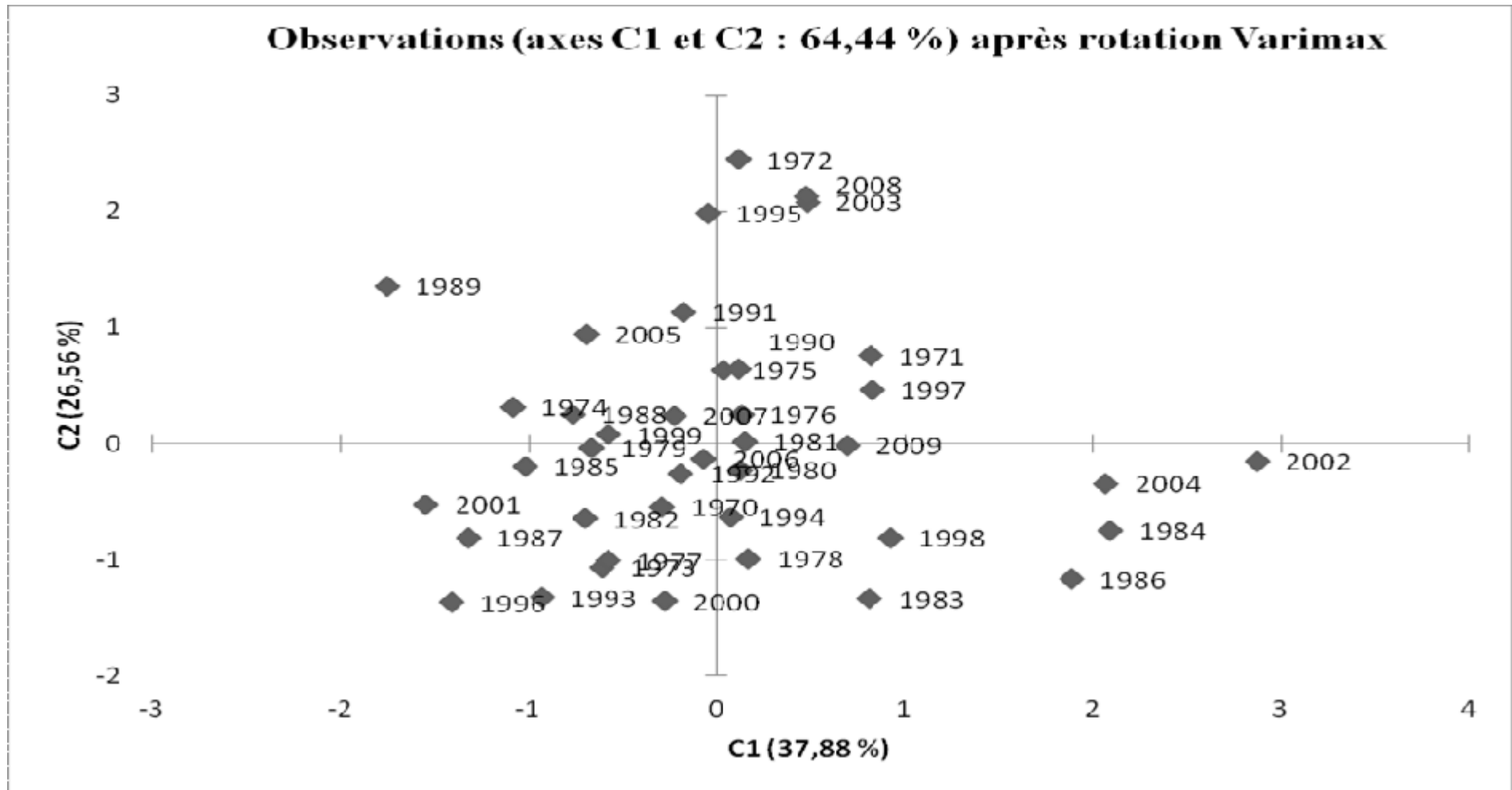


Figure V.22 : Distribution des années sur les deux axes



### Conclusion :

L'indice standardisé des précipitations est un outil très intéressant pour caractériser les années humides et les années sèches. A échelle annuelle, on peut mettre en évidence les observations suivantes:

- Quatre années exceptionnellement humides, à savoir, les années 1972, 2002, 2003 et 2008.
- Quatre années exceptionnellement sèches à signaler ; 1987, 1993, 1996 et 2001.
- Les trente une années restantes sont considérées comme normales, dans les quelles on peut rencontrer quelques stations sèches et/ou humides.

A l'échelle saisonnière on peut dire que les sécheresses printanières sont survenues dans la région pendant la période allant de 1977 à 2009.

L'analyse en composantes principales, a mis en évidence à l'échelle spatiale une régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale, selon deux groupes : le nord sur le littoral et Atlas Tellien, et le sud sur les monts de Belezma, les Hauts Plateaux constantinois et les monts de Nementcha.

A l'échelle temporelle, la sécheresse commence de puis les années 1970.

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, mené sur la régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale, nous avons essayé de dégager les grands traits sur le phénomène de la sécheresse, du point de vue définition, les différents types et les impacts. Cependant, l'insuffisance des données pluviométriques et particulièrement l'absence de longues séries de données pluviométriques, n'a pas rendu possible l'approfondissement de ce travail.

La présente étude est basée sur l'analyse des données pluviométriques observées au niveau de notre région. Nous avons choisi 32 stations, réparties d'une manière plus au moins homogènes, sur toute la zone d'étude. L'analyse des données montre que certaines séries présentent un certain nombre de lacunes. Pour combler ces lacunes, nous avons utilisé la méthode de la régression linéaire, après les séries doivent être vérifiées par les hypothèses de base : l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité, les résultats obtenus de ces tests donnent seulement 30 stations qui vérifient les hypothèses de base.

Par la suite, la méthode adoptée en vue l'identification et de la quantification des périodes sèches et humides est basée sur le calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).

Les principaux résultats obtenus se résument dans ce qui suit :

- 71,2% d'années normales, 15,2% d'années humides et 16,2% d'années sèches.
- Pour les années humides on a : 4,1% d'années très humides (TH), 3,9% d'années modérément humide (MH).
- Pour les années sèches on a : 11,6% d'années modérément sèches (MS) et 0,6% d'années très sèches.
- Les années les plus humides : 1972, 2002, 2003 et 2008.
- Les années les plus sèches : 1987, 1993, 1996 et 2001.

- Les sécheresses printanières sont survenues pendant la période allant de 1977 à 2001.

L'Analyse en Composantes Principales, a mis en évidence à l'échelle spatiale une régionalisation de la sécheresse en Algérie orientale, selon deux groupes : le nord sur le littoral et l'Atlas Tellien, et le sud sur les monts de Belezma, les Hauts Plateaux constantinois et les monts de Nementcha. A l'échelle temporelle, la sécheresse commence de puis les années 1970.

A la fin de ce travail, on peut dire que le phénomène de la sécheresse ne constitue pas en fait un événement exceptionnel, mais un phénomène fréquent qui a toujours pesé sur l'homme et son environnement. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons mis en évidence des corrélations avec d'autres paramètres qui peuvent intervenir dans l'explication de la sécheresse comme la température et l'évapotranspiration.

### Références bibliographiques

**ACHITE M., TOUAIBIA B., 2007.** Sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant de la Mina; Gestion de la demande en eau en Méditerranée, progrès et politiques. Saragosse, 19-21 mars.

**ACHITE M., AMRANI R., BELHADJ LARBI B., 2011.** Assessment of meteorological drought using SPI index in the wadi Sly basin, Algeria. The first International Conference on Water, Energy and Environment (ICWEE) Sharjah, UAE, November 14<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>.

**ADEME , 2015.** Agence de l'Environnement du Ministère de l'Energie, le changement climatique.Paris.

**AGHRAB A., 2003.** Caractérisation de la sécheresse et élaboration des indicateurs climatiques pour son alerte précoce dans la région du Sais. Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc.

**AISSAT D., 2006.** Crues et sécheresses en Algérie, impact sur l'environnement Cas du Moyen Chelif .Thèse magistère .UHB Chlef,142 p.

**BEAUDIN I., 2006.** Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresses en milieu méditerranéen. Thèse des études supérieures de l'Université Laval, Espagne, 216 p.

**BENABDESSELAM T., AMARCHI H., 2013.** Approche régionale pour l'estimation des précipitations journalières extrêmes du nord-est algérien. Courrier du Savoir - N° 17, Décembre 2013, pp.175-184.

**BOBEE B.,BOUCHER P.,DERMARD H., 1978.** Demande en eau des résidences, analyse statistique des débits de pointe, rapport scientifique N°30 INRS-Eau.

**BOUCIFIANE A., 2006.** Cartographie des précipitations du bassin hydrographique Chélif-Zahrez. Thèse magistère CUKM, Khemis Miliana.

**BOUDOUKHA A., MESSAID B., 2014.** Caractérisation électrique des formations aquifères de l'est algérien. Courier du Savoir – N°18, pp 77-82.

**CEGLAR A., CREPINSEK Z., KAJFEZ-BOGATAJ L. 2008.** Analysis of meteorological drought in Slovenia with two drought indices. Republic of Macedonia – 27, 31 May.

**ELLOUZA ET ABIDA, 2008.** Caractérisation de la sécheresse au sud Tunisien, 13<sup>th</sup> World Water Congress, Montpellier, France, 14 p.

**GARGOURI K., LAJIMI A., CHEBIL A., BEN AOUN W., 2010.** Drought occurrence and its impact on olive production and cereals in Tunisia. Options Méditerranéennes. A no. 95. Economics of drought and drought preparedness in a climate change context.

**GIEC, 2007 .** Bilan 2007 des changements climatiques, (OMM), Genève, Suisse.

**GUTTMAN N.B., 1994.** On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climate, pp 1026–1029.

**JOINA, J.L., COUDRAYA, J. et LONGWORTH, K., 1997.** Using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island: the example of Reunion, Journal of Hydrology, Vol. 190, (1-2) pp 1-18.

**JOUILIL I., BITAR K., SALAMA H., AMRAOUI, MOKSSIT A., TAHIRI M., 2013.** Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA durant les dernières décennies , Larhyss/Journal n° 12, pp 109-127.

**KATSIBANI K., MAVRAKIS A., 2011.** Spatial and temporal evolution of drought episodes in Greece with use of the SPI meteorological drought index. Proceedings of the 12<sup>th</sup> international conference on environmental science and technology Rhodes. Greece. Septembre 8<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>.

**KENDALL M., STUART A., ORD J.K., 1983.** The advanced theory of statistics, griffins.

**KETTAB A., AIT MOUHOUB D., OUARDA T. et BOBBEE B., 2004.**

Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie. E.N.P. Alger, 12 p.

**KHALDI A., 2005.** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". Thèse de doctorat d'Etat en Hydrogéologie, U.S.T, Oran., 230 p.

**KHOUALDIA W., DJEBBAR Y., HAMMAR Y., 2014.** Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de La Medjerda (nord-est algérien). Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23.

**LABEDZKI L., 2007.** Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index (SPI). Irrig. And Drain. 56: 67-77.

**LASKA MERKOCI A., MUSTAQI V., JAUPAJ O., COMO E., BARDHI A., DVORANI M., 2012.** Droughts and their impact on the Albanian territory. Agriculture and Forestry, Vol. 58. Issue 1: 7-17.

**Livada I., ASSIMAKOPOULOS V.D., 2007.** Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). Theor. Appl. Climatol. 89, 143–153.

**LOUKAS A., VASILIADES L., 2004.** Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece, Natural Hazards and Earth System Sciences 4: 719–731.

**MAGNO R., GUARNIERI F., GOZZINI B., MENEGUZZO F., MARACCHI G., PASQUI M., 2007.** Analysis of long dry spell series for drought detection and monitoring in Central Italy. Climate change and desertification: monitoring, modeling and forecasting. September 10<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>.

**MANUEL REYES-GOMEZ V., NUÑEZ LOPEZ D., ALFONSO MUÑOZ ROBLES C., ALFREDORODRIGUEZ PINEDA J., GADSDEN H., LOPEZ ORTIZ M. et RAUL HINOJOSA DE LA GARZAO., 2006.** Caractérisation de la

sécheresse hydrologique dans le bassin versant du Rio Conchos (Mexique), Revue sécheresse, vol 17, n°4 : pp 475-88.

**MARTIN A.G.L., 2003.** Modélisation stochastique des régimes pluviométriques à l'échelle régionale pour la prévision des crues au nord-Mexique. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique, 197 p.

**MCKEE T. B., DOESKEN N. J. et KLEIST J., 1993.** The relationship of drought frequency and duration to time scales. American Meteorological Society, 8<sup>th</sup> Conference on applied climatology, January 17<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup>, Anaheim, CA, pp 179-184.

**MCKEE, 1995.** Drought monitoring with multiple timescales. In: Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology, Dallas, Texas, Boston American Meteorological Society, pp 233–236.

**MEBARKI A., 2009.** Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est. Office des Publications Universitaires, Algérie. 389 p

**MEDDI H., MEDDI M., 2007.** Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie par la Méthode Pluvia. Geographia Technica N° 2: 44-62.

**MEDDI H., MEDDI M., 2009.** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse 20: 57-65.

**NDMC, 2008.** National Drought Mitigation Center; Consulté en ligne : <http://enso.unl.edu/ndmc>.

**OBLED, CH., 1979.** Contribution à l'analyse des données en hydrométéorologie. Thèse de docteur d'état sciences physiques, INPG.

**NIOX C., 1980.** Géographie militaire. 2<sup>ème</sup> édition. Algérie et Tunisie.

**OMM, 1994. Organisation Météorologique Mondiale** « guide des pratiques hydrologiques (acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications )» ,cinquième édition 1994, WMO-N 168, 793 p.



**OMM, 2006. Organisation Météorologique Mondiale.** Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs, OMM-N°1006, Genève Suisse, 26 p.

**OMM, 2012.** Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, OMM-N° 1090, 25 p.

**OSS, 2006.**Evaluation des Dispositifs d'Alerte Précoce à la Sécheresse à l'Echelle Nationale (Cas du Maroc),61 p .

**OSS, 2007.** Evaluation des systèmes existants d'alerte précoce à la sécheresse , Tunisie (SAPA), 93 p.

**OSS, 2008.** Projet de Mise en place d'un Système d'Alerte précoce à la Sécheresse dans trois pays de la rive Sud de la Méditerranée: Algérie, Maroc, et Tunisie,38 p.

**OSS, 2009.** Observatoire du Sahara et du Sahel. Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb, Observatoire du Sahel et du Sahara. Collection Synthèse N° 4. OSS, Tunis. 84p.

**OSS, 2013.** Gestion intégrée de la terre et de l'eau pour l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Mali,9 p.

**PALMER W.C., 1965.**Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Research Paper 45, Washington DC, 58 p.

**PANDAY R.P., PANDAY A., GALKATE R.V., ·BYUM H.R., 2010.** Integrating Hydro-Meteorological and Physiographic Factors for Assessment of Vulnerability to Drought. Water Resources Management 5: 9653-9670.

**RICHARDS W. Et BURRIDG E., 2006.** Historical Drought Detection and Evaluation Using the Standardized Precipitation Index and Gridded Data. (Environment Canada 2006). Presented by the Minister of the Environment.

**SEBBAR A., BADRIL W., FOUGRACH H., HSAINE M., SALOUI A., 2011.**

Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), Sécheresse 22: 139-148.

**TAZDAITA., 2012.** Etude de la persistance de la sécheresse au niveau la plaine de la Mitidja à l'aide des chaînes de Markov. Thèse de magistère, ENSH Blida, 266p.

**TOPCU S., SEN B., TÜRKES M., SEN B., 2010.** Observed and projected changes in drought conditions of Turkey. Options Méditerranéennes. A no 95. Economics of drought and drought preparedness in a climate change context.

**UNCCD, 2000.** United Nations Convention to Combat Desertification (2000): Conférence des parties. Comité de la science et de la technologie, Rapport du Groupe GE.00-64137, Quatrième session Bonn.

**VICENTE-SERRANO S.M., BEGUERÍA B et LÓPEZ-MORENO J.I., 2010.** A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. Journal of Climate, pp 1696–1718,

**VILA J. M., 1980.** La chaîne alpine d'Algérie orientale et les confins Algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Paris VI, France.

**WILCOXON F., 1945.** Individual comparaisons by ranking methode biometries, pp 80-83.

**WILDI W., 1983.** La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique, Paris, Masson, 10, 201-297.

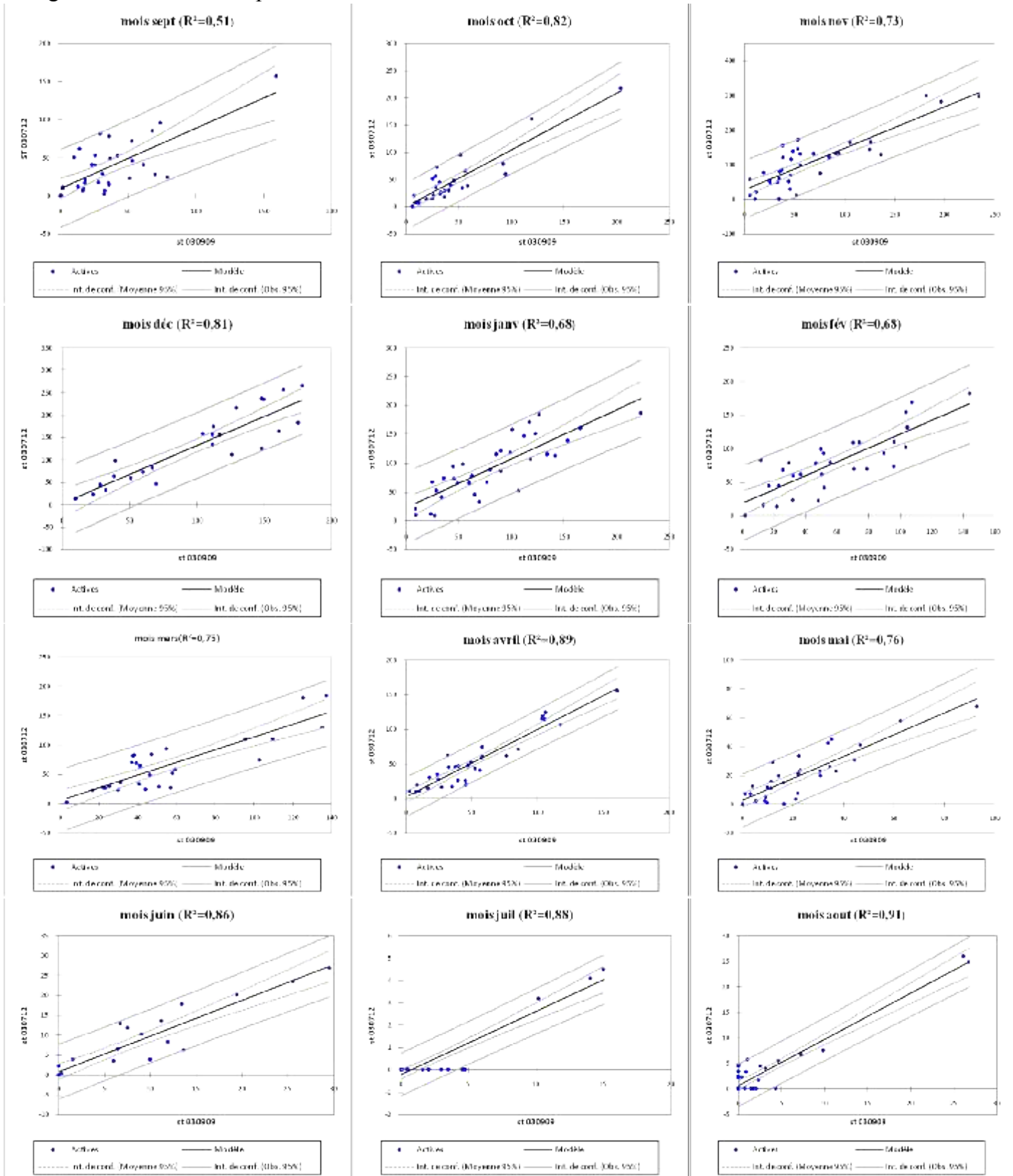
**WOTLING G., BOUVIER CH., DANLOUX J. et FRITSCH J.M., 2000.**

Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment, Journal of Hydrology, Vol. 233 (1-4) pp 86-101.

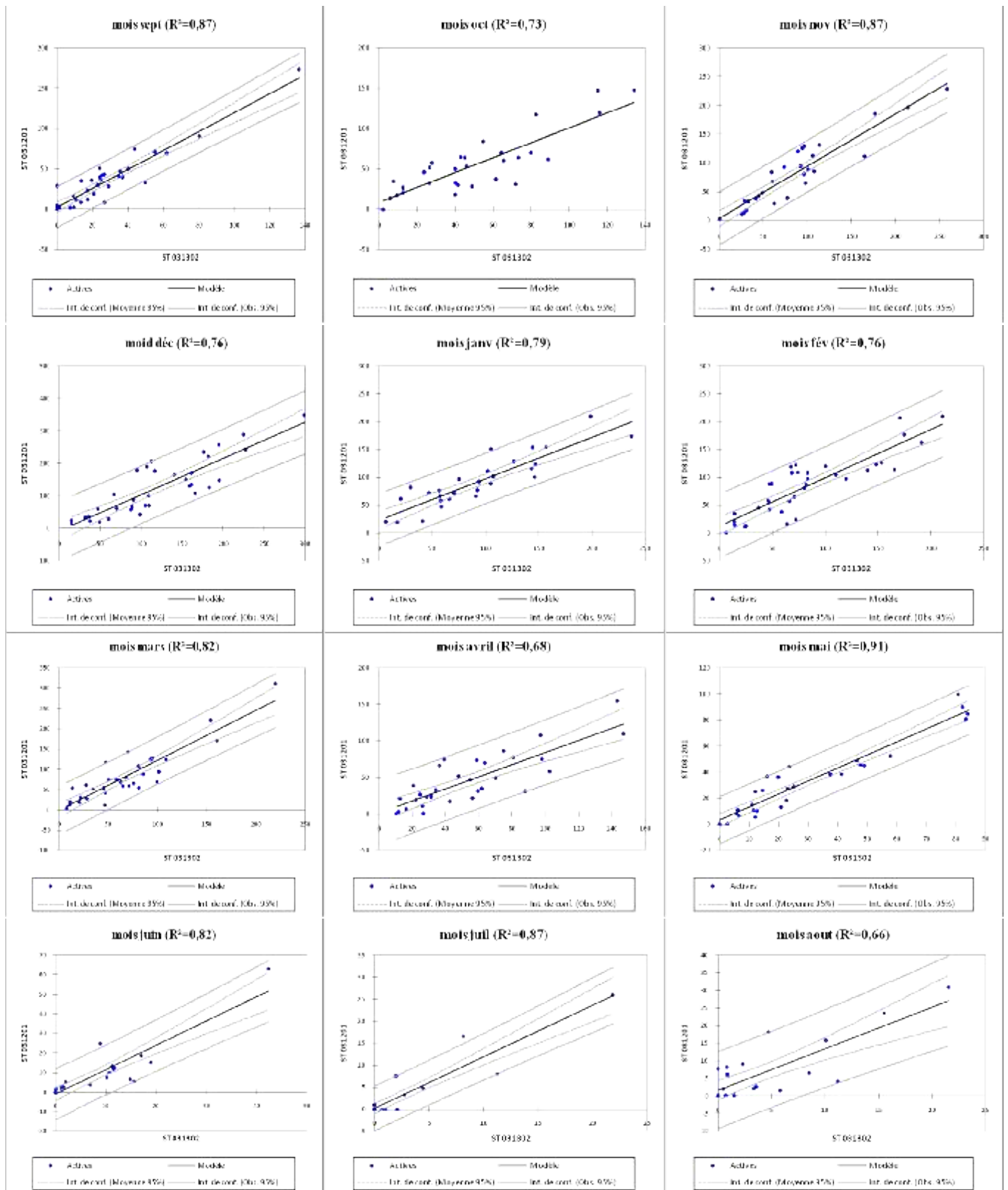
**YILDIZ O., 2009.** Assessing temporal and spatial characteristics of droughts in the Hirfanli dam basin, Turkey. Scientific Research and Essay 44: 249-255.

Annexe III. 1 : Régression des stations

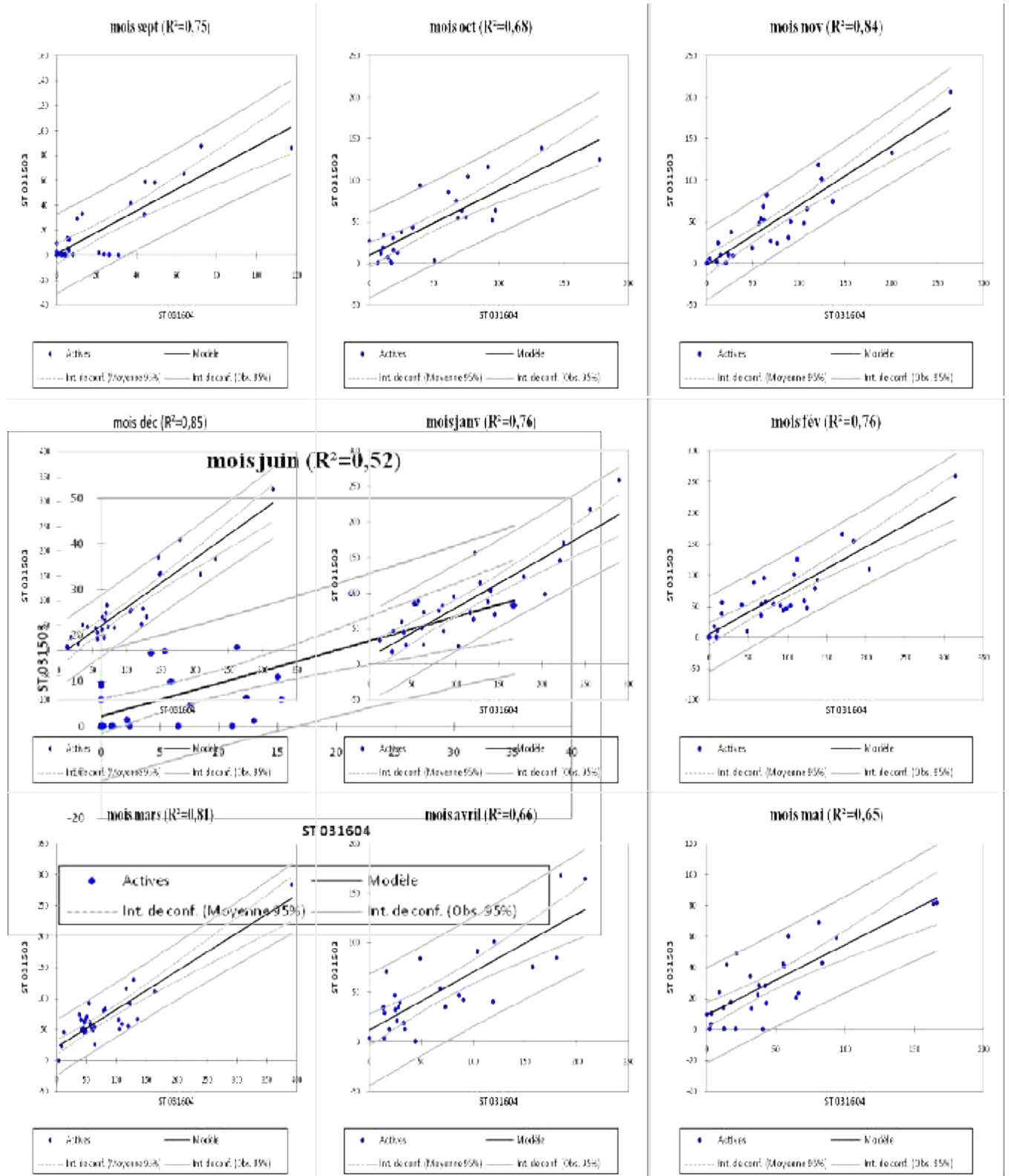
Régression de st 030712 par st 030909



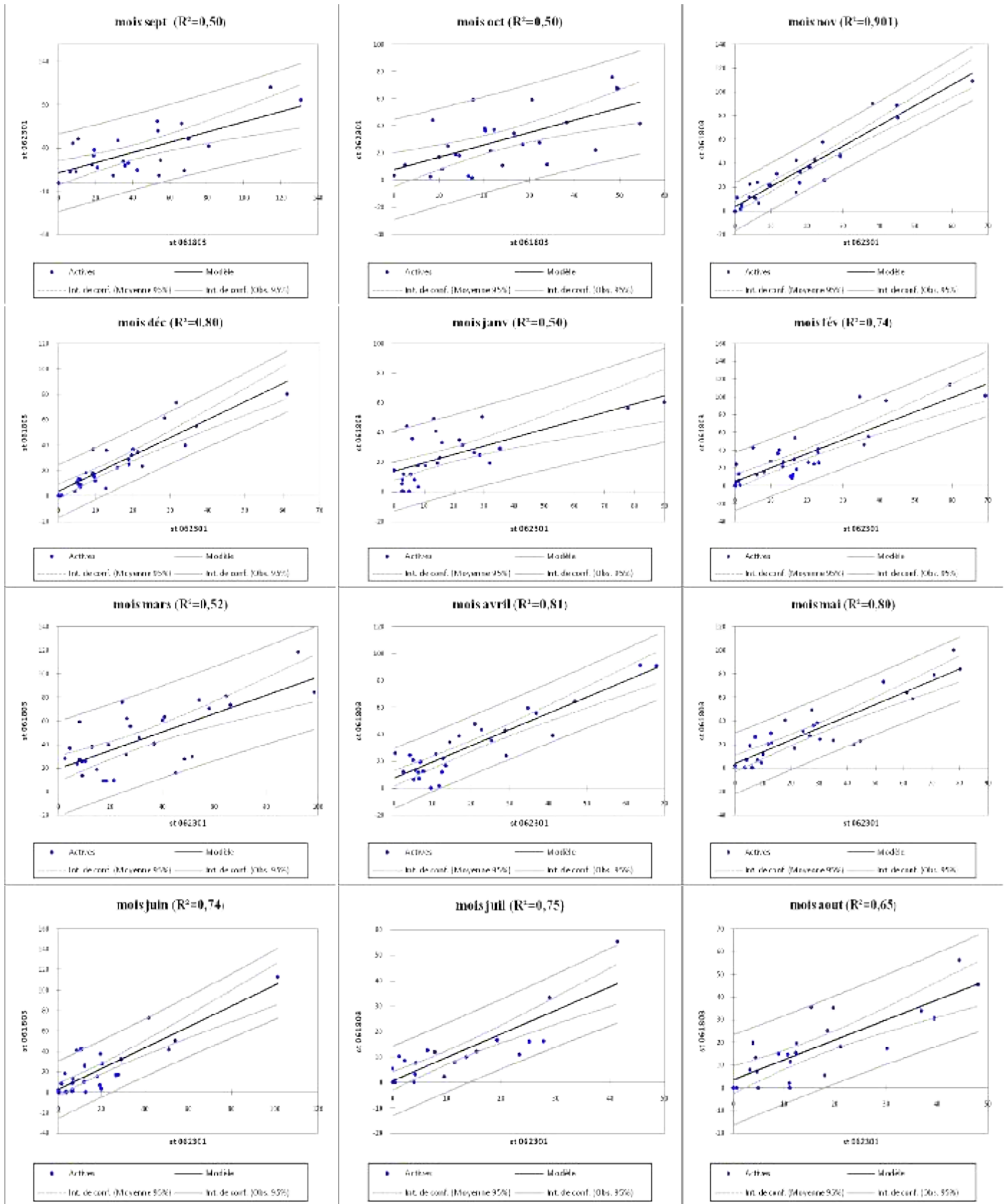
Régression de ST 031201 par ST 031302



Régression de ST 031503 par ST 031604

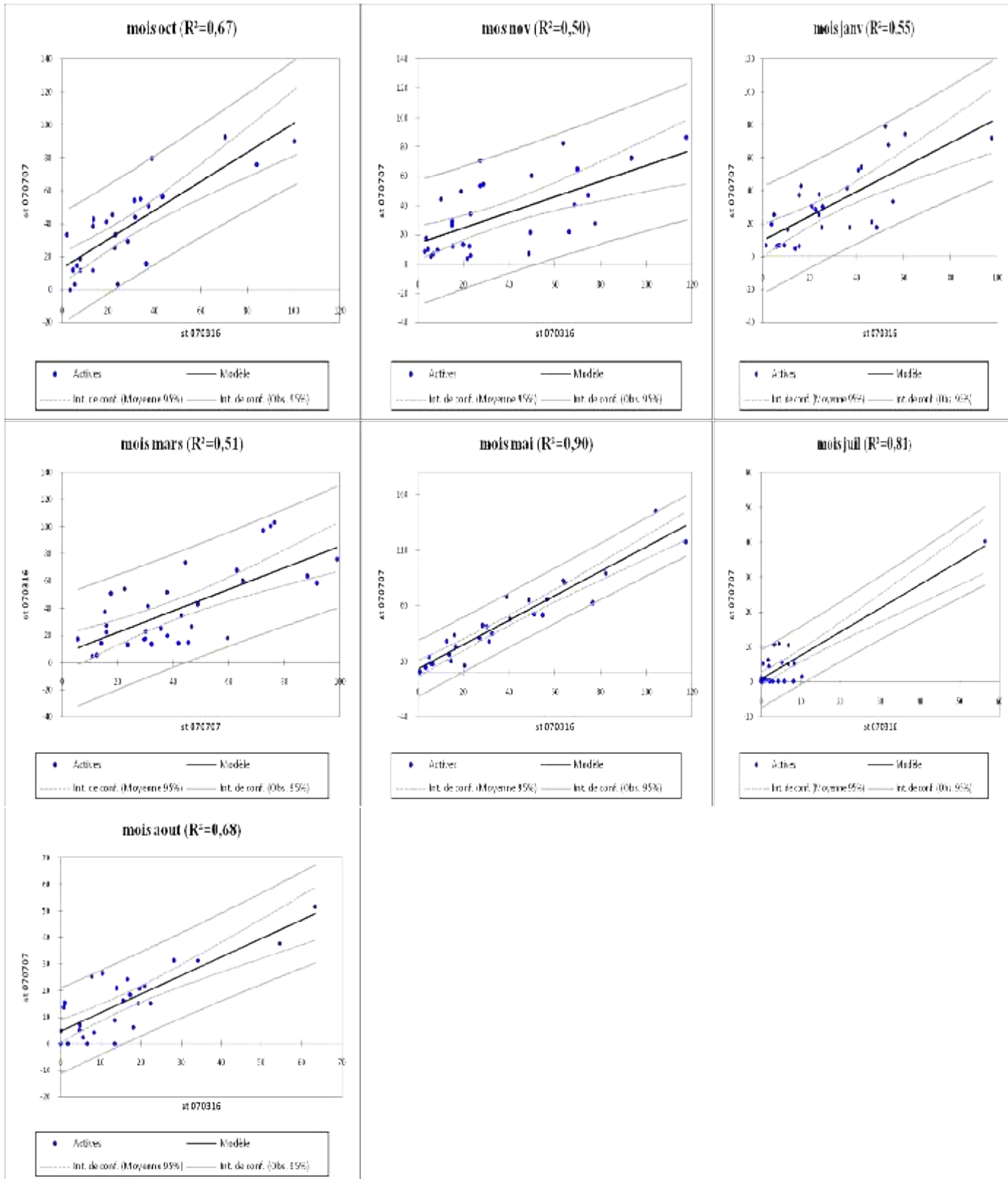


Régression de st 062301 par st 061803 :



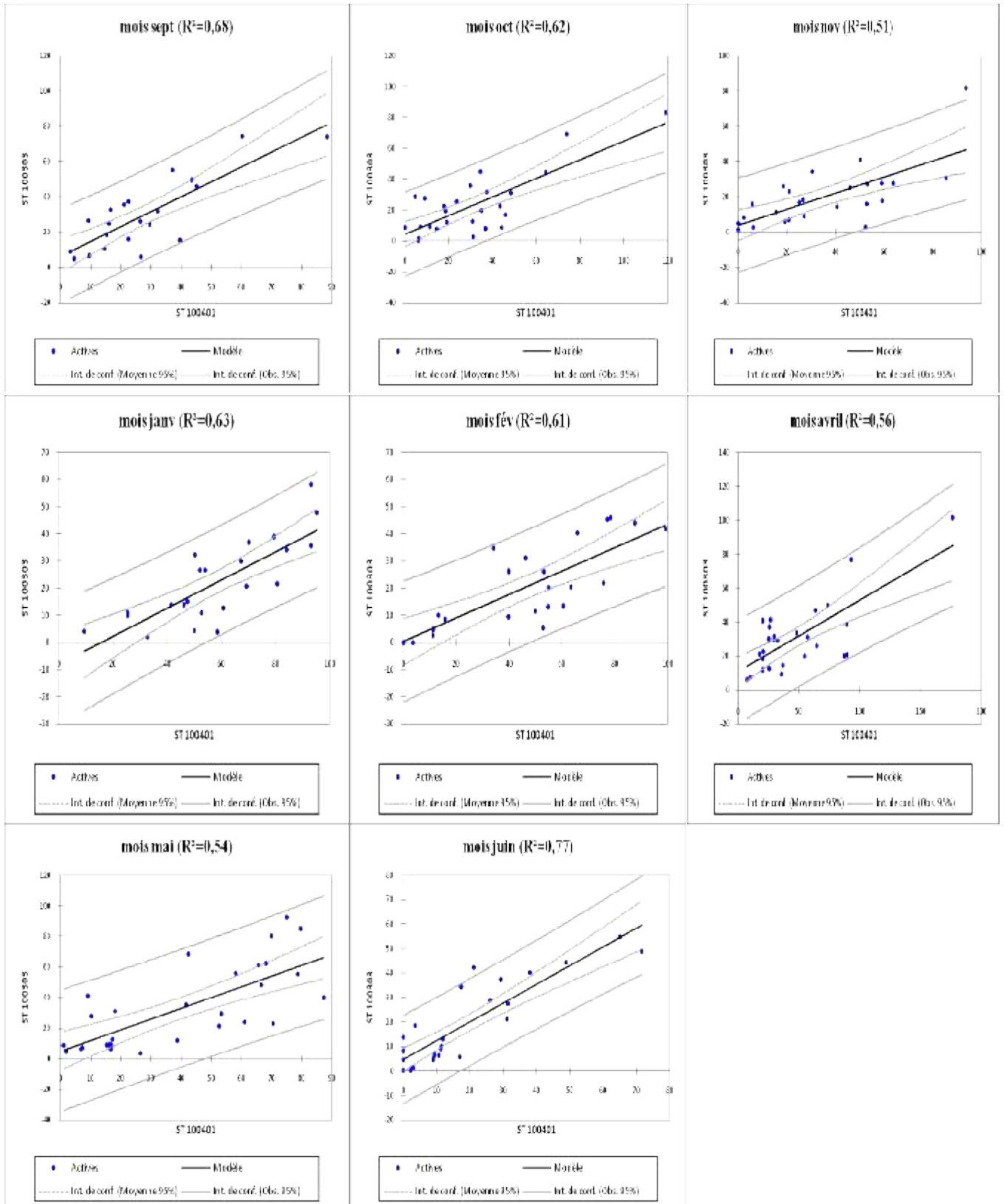


Régression de st 070707 par st 070316

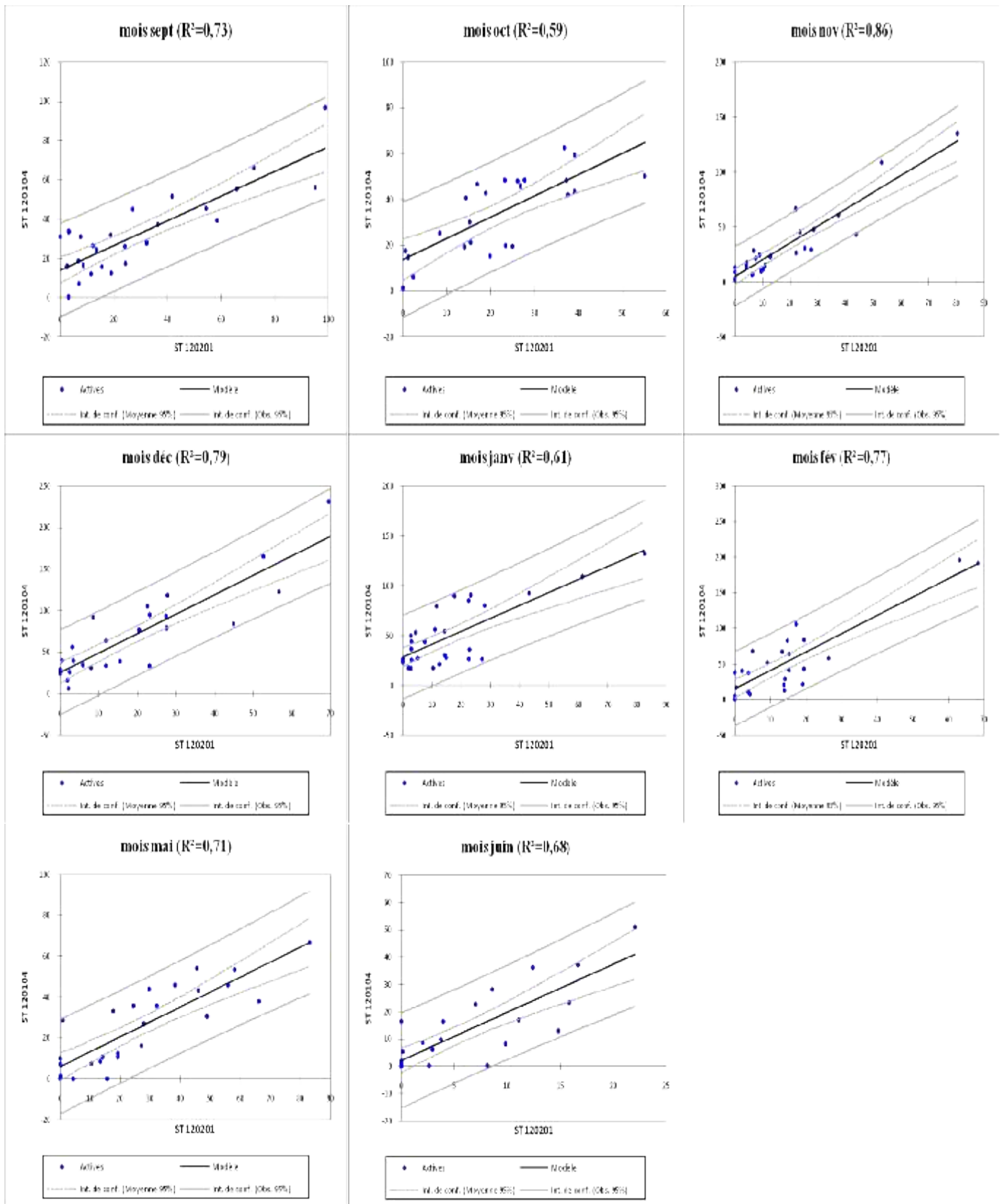




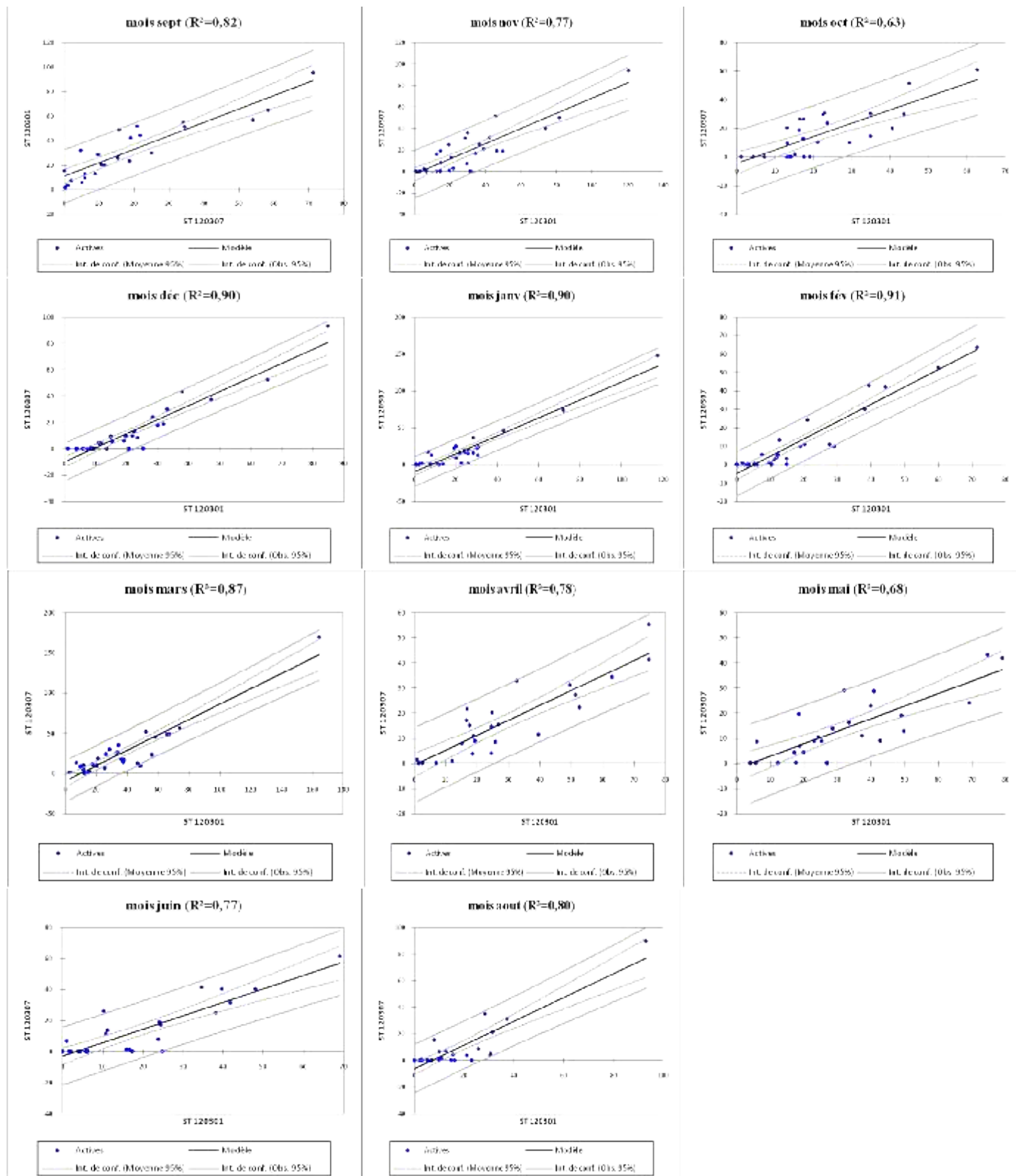
Régression de ST 100303 par ST 100401



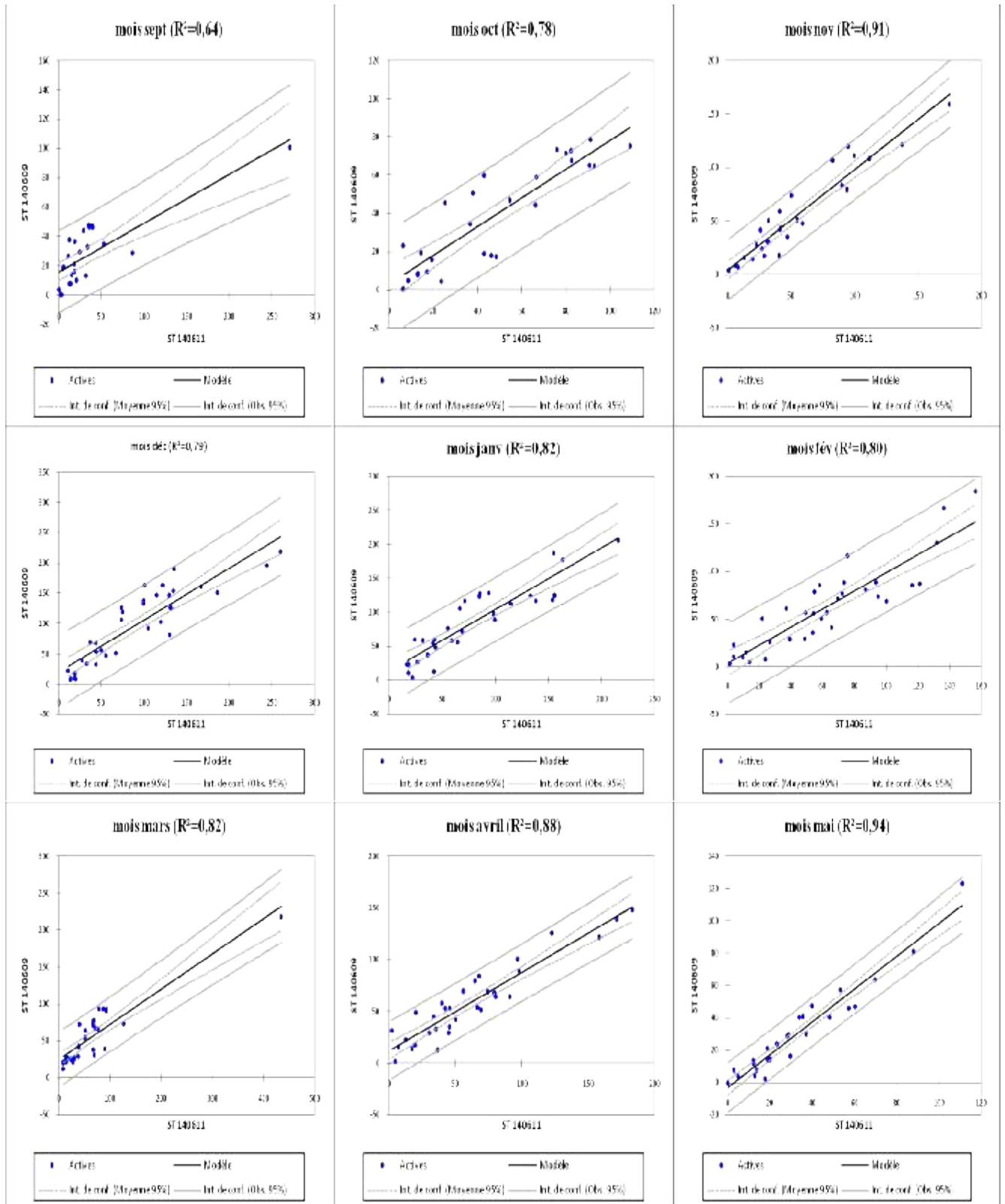
Régression de ST 120104 par ST 120201



Régression de ST 120307 par ST 120301



Régression de ST 140609 par ST 140611



## Annexe V. 2 : Calcul du SPI annuel pour chaque station

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30
1970	0,17	-0,95	-0,20	-0,08	0,49	-0,79	0,53	-0,25	0,39	-1,55	-1,30	1,68	-0,18	-2,29	-0,59	-1,30	-1,02	-1,09	0,37	-0,34	-0,37	0,74	-0,34	-0,04	-0,07	-0,62	-1,84	-0,11	0,62	-0,40
1971	0,56	0,95	0,90	0,37	1,03	0,22	0,40	1,06	0,49	0,44	0,27	1,44	1,65	0,95	1,46	-1,58	0,18	1,21	1,50	1,68	2,56	0,60	0,86	-1,05	0,97	0,84	1,22	1,18	-0,21	0,60
1972	0,39	0,71	1,34	-0,01	-0,36	0,89	1,08	1,03	1,33	1,26	1,43	0,45	2,68	0,06	1,33	2,39	1,72	0,22	0,40	2,75	2,53	3,10	1,57	0,95	0,77	0,16	0,88	1,87	1,05	0,46
1973	-0,10	0,25	-0,13	-0,32	-0,62	-1,34	-0,66	-0,51	-0,72	-0,27	-0,72	-0,73	-1,41	-0,91	-0,63	-0,73	-1,67	-1,03	0,54	-0,97	-1,12	0,14	-1,12	-2,37	-1,46	-1,33	-1,56	-1,73	-1,10	0,21
1974	-0,90	-0,36	-0,54	-0,91	-1,39	-0,86	-0,51	-0,62	0,58	-0,50	-0,35	-0,05	-0,22	-0,03	-0,14	0,11	-0,48	-1,08	-0,09	-0,20	0,32	0,81	-0,48	0,03	-0,48	-0,71	-0,99	-1,10	-0,95	-0,85
1975	0,97	0,84	0,51	0,12	-0,06	-0,90	-0,92	-0,56	-0,07	0,45	0,69	-0,85	1,37	0,65	1,06	0,94	-0,18	1,07	0,35	-0,22	0,38	-0,14	0,87	0,86	0,49	0,05	0,01	0,03	-0,22	1,65
1976	-0,58	-0,28	-1,11	0,42	0,42	-0,56	0,29	0,69	0,41	0,28	0,53	-0,16	0,72	-0,19	0,45	-0,39	0,20	0,02	-0,07	0,21	-0,37	-0,60	1,77	2,15	0,33	0,37	0,71	0,58	0,31	-0,72
1977	0,64	-1,24	-2,48	-1,47	-0,83	-0,97	-0,65	-0,38	0,55	-1,53	-0,62	-1,14	-1,28	-1,54	-1,54	-1,24	0,09	-0,31	-0,44	-0,89	0,37	-1,57	0,07	-0,42	-0,36	-0,95	-0,40	-0,59	-0,50	-0,69
1978	-0,01	-0,49	-0,02	0,85	0,26	0,00	-0,30	-0,48	-0,33	-0,21	-1,06	-1,70	-1,11	-1,15	-0,79	-0,85	-0,25	0,00	0,16	0,12	-0,46	-0,65	-0,12	0,32	-0,20	-0,76	0,10	0,00	-0,27	-0,81
1979	0,24	-0,79	-0,42	-0,03	-0,72	-0,70	-0,57	-0,03	0,27	-0,36	-0,45	-0,60	-0,16	-0,44	-0,67	-0,33	0,24	-0,25	-0,29	-0,91	0,71	-0,03	0,41	0,16	-0,90	-1,00	-0,82	-0,66	-0,92	-0,52
1980	1,30	-0,25	0,49	1,24	0,24	-0,18	-0,42	-0,17	-0,82	-0,27	0,50	-0,40	-0,86	0,16	-0,37	-0,38	0,45	-0,36	0,68	-0,01	0,32	-0,11	0,10	0,40	-0,06	-0,59	0,11	-0,04	-0,54	-0,62
1981	0,69	0,18	-0,08	-0,30	0,56	0,33	0,87	0,44	-0,61	-0,17	0,16	0,14	0,33	0,99	0,02	-0,19	-0,11	0,57	-0,19	-0,15	0,05	0,34	0,07	-0,35	-0,21	-0,36	-0,59	-0,41	-0,50	1,17
1982	-0,77	-0,74	-1,07	-1,21	-0,65	0,24	-0,56	-0,49	-1,48	-0,54	-0,40	-1,04	-1,06	-1,36	-0,39	-1,11	0,00	-0,12	-1,05	-0,60	0,09	-0,62	-0,99	0,08	-1,02	-0,71	-0,61	-0,80	-1,59	-0,10
1983	-0,66	1,16	-0,72	-0,31	0,56	0,50	0,45	1,01	-0,05	-1,30	-1,35	-0,57	-0,60	-0,88	-0,65	-1,77	-0,22	0,15	0,63	-0,05	-0,14	-1,24	-0,76	-0,07	0,04	0,72	1,76	-0,03	0,00	-0,15
1984	0,63	1,81	0,51	1,29	3,15	2,29	1,51	0,65	-0,68	0,80	-0,06	0,23	0,29	-0,44	0,34	0,23	0,57	3,09	2,72	0,31	-0,24	-0,40	-0,36	0,87	0,52	1,68	0,98	0,45	1,55	0,48
1985	-0,95	-0,84	-0,17	-0,31	-0,79	-1,02	-0,79	-1,22	-2,38	0,53	0,47	-0,27	0,04	-0,44	0,56	0,17	-1,39	-0,97	-0,03	-1,08	-0,97	-0,82	-1,81	-0,14	-0,81	-1,19	-0,89	-1,06	-1,06	-0,35
1986	0,55	1,60	0,24	-0,43	1,74	2,19	1,16	1,23	-1,48	-0,39	-0,14	-0,51	-0,49	0,23	-0,36	-0,30	-0,34	2,40	0,53	0,26	-0,76	-0,79	0,59	-0,03	1,03	1,91	1,81	1,01	1,14	0,90
1987	-0,78	-1,18	-1,51	-1,67	-1,30	-1,43	-1,17	-0,95	-0,37	-0,80	-1,25	-1,50	-0,46	-1,04	-1,31	-0,74	-0,81	-1,11	-1,32	-1,19	-1,41	-0,46	-0,81	-0,08	-0,72	-0,88	-1,27	-1,22	-1,40	-1,85
1988	-0,53	0,65	0,24	-0,18	-0,84	-0,69	-1,68	-0,95	0,75	-0,16	0,63	0,39	0,19	1,07	0,52	0,64	-0,64	-0,56	-0,27	-0,88	-1,03	-0,39	-1,03	-0,40	-0,52	-0,43	0,05	-0,83	-0,62	-1,50
1989	-1,32	-1,27	-1,28	-1,41	-0,60	-0,63	-1,50	-1,12	0,88	0,12	0,56	1,18	0,39	-0,24	1,16	1,15	0,09	-1,24	-1,46	-1,30	1,21	1,22	-1,08	0,10	-0,43	-1,08	-0,77	-0,49	-0,44	-0,65

## Annexes

### Annexe V. 2(Suite) : Calcul du SPI annuel pour chaque station

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30
1990	0,05	-0,23	0,23	-0,38	0,11	1,26	0,15	-0,69	2,10	-0,59	-0,81	-0,24	1,34	0,89	0,81	1,25	0,39	-0,06	0,99	0,65	0,09	0,49	0,33	0,67	0,73	0,17	0,63	0,57	0,27	-0,04
1991	-0,60	0,20	0,72	-1,70	0,72	0,43	0,02	-0,49	-0,35	0,55	0,28	0,33	0,30	1,14	0,06	1,74	1,39	0,60	-0,57	-0,01	0,31	2,25	1,34	0,32	0,53	-0,01	0,44	0,10	0,42	1,11
1992	-1,15	-0,27	-0,26	-1,10	-0,22	0,19	-0,18	-0,11	0,11	-0,51	-0,53	-0,83	0,60	-0,27	-0,56	0,78	-0,46	-0,34	-0,90	-0,91	-0,30	-0,96	-0,53	0,59	0,70	0,92	0,25	0,19	0,22	-0,57
1993	-1,00	-1,17	-1,28	-0,83	-0,97	-0,62	-0,65	-2,24	-1,27	-1,18	-1,25	-0,77	-0,93	-1,36	-1,81	-0,29	-1,54	-1,08	-0,71	-1,07	-1,52	-1,14	-1,13	-1,39	-0,69	-0,98	-0,84	-1,33	-0,74	-1,32
1994	-0,08	0,19	0,17	0,03	0,34	-0,10	-0,98	-1,16	-0,71	-0,43	-0,62	-0,77	-0,70	0,05	-0,23	0,44	-0,25	0,34	-0,23	-0,07	-0,55	-0,50	-0,92	-1,15	-0,15	0,93	-0,13	-0,49	-0,28	0,33
1995	-0,18	-0,16	0,95	-0,44	0,37	1,05	0,51	0,29	0,74	1,63	0,30	1,02	1,43	1,03	1,27	2,32	2,68	0,38	-0,03	1,62	1,52	1,32	1,02	0,62	-1,39	0,22	0,77	1,78	0,54	1,32
1996	-1,84	-1,86	-1,18	-1,00	-1,26	-1,72	-0,96	0,28	-0,94	-1,60	-1,43	-1,03	-1,02	-0,87	-1,75	-1,02	-1,85	-1,68	-1,23	-1,61	-1,80	-1,16	-1,45	-1,16	-2,26	-1,58	-1,91	-1,35	-1,63	-1,30
1997	2,61	0,77	0,35	0,19	-0,40	0,42	0,46	2,22	1,01	1,17	0,65	0,75	0,87	0,78	0,94	0,76	0,79	0,52	1,80	0,67	0,08	-0,06	0,13	-0,94	0,03	0,43	1,01	1,77	0,42	-0,33
1998	2,31	0,25	0,71	0,38	-0,08	1,19	0,45	0,13	0,14	-0,97	-0,82	-0,72	-0,11	-0,13	-1,17	0,01	0,05	0,11	-0,07	0,05	-0,32	-0,59	0,05	0,10	3,46	0,06	0,13	0,73	0,79	-0,64
1999	-0,96	-1,26	-0,63	0,70	-1,02	-0,39	-0,44	0,02	0,16	-0,06	-0,61	-0,51	0,33	0,64	-0,66	0,69	-0,71	-0,32	-0,92	0,51	0,06	0,32	-0,48	-1,18	0,34	-0,35	-0,46	0,35	-0,46	-1,03
2000	-1,26	-0,45	-0,61	0,18	-1,23	-1,09	-0,57	0,04	0,10	-1,13	-1,25	-1,45	-1,70	-1,15	-1,02	-0,68	-0,58	-0,67	-0,73	-0,21	-0,88	-1,34	-0,14	-2,09	-0,18	-0,32	-0,66	-0,41	-0,55	-1,12
2001	-0,79	-1,24	-1,91	-0,63	-0,96	-1,58	-1,72	-1,36	-1,28	-1,12	-1,23	0,30	-0,63	-1,51	-1,16	-0,95	-0,01	-1,70	-1,81	-1,25	-0,91	-0,35	-0,93	0,42	-1,22	-0,87	-1,53	-1,64	-1,18	-1,08
2002	1,59	2,46	2,26	2,90	2,04	1,65	1,81	2,31	-0,09	1,48	0,57	1,02	-1,12	0,84	0,94	1,43	1,77	1,09	2,46	2,21	-0,85	0,29	2,83	-1,01	2,09	2,65	1,37	2,26	1,94	2,84
2003	-0,56	1,38	0,41	0,37	0,82	0,76	0,49	-0,88	-0,09	2,23	3,00	1,72	0,88	2,32	2,15	0,78	1,73	0,52	0,31	1,98	1,60	0,27	0,84	2,79	1,22	2,16	1,51	1,35	0,87	1,22
2004	0,54	1,88	1,80	1,91	1,80	1,47	2,86	2,14	2,01	0,27	0,77	0,40	-0,75	0,90	0,75	0,25	0,68	1,16	0,56	0,67	-0,60	-0,92	1,36	0,81	0,65	1,72	1,52	0,50	1,67	0,88
2005	0,29	-0,36	0,12	0,34	-0,70	-0,13	-0,70	-0,33	-1,16	0,72	0,92	0,98	0,24	1,16	0,56	-0,26	-0,10	-0,73	-0,80	0,21	0,97	0,78	-0,23	1,07	-0,47	0,00	-0,05	-0,79	-0,76	0,32
2006	-1,12	-0,52	0,41	-0,01	-0,20	-0,12	0,10	0,57	0,71	-0,47	0,34	-0,22	-0,17	-0,20	-1,05	-0,43	-1,04	0,31	-1,40	0,49	-0,16	0,28	0,32	-0,31	-0,31	-0,01	-0,03	0,22	0,15	0,81
2007	0,92	0,59	1,14	0,17	-0,41	-0,34	-0,11	-0,02	-0,59	0,73	0,95	1,08	-0,25	0,74	-0,01	-0,38	-0,54	-0,35	-0,54	-0,66	-0,19	-0,14	-0,97	0,49	-0,46	-0,55	-0,68	-0,62	0,00	0,63
2008	1,29	0,13	0,92	1,42	0,24	0,32	1,41	1,28	1,45	2,36	2,16	2,88	2,16	1,32	1,65	-0,41	1,75	0,52	0,53	0,45	1,54	2,06	1,29	0,79	0,65	0,09	0,95	0,98	2,81	1,05
2009	0,42	-0,06	1,23	1,83	0,73	0,74	1,46	-0,41	1,29	1,12	1,07	0,07	-0,61	0,53	0,81	-0,73	-0,57	0,80	0,63	-0,25	0,24	-0,01	-0,14	-0,43	-0,20	0,20	-0,17	-0,22	1,13	0,65

Annexe V. 3 : Calcul du SPI-03 pour chaque station

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30
1970	-0,05	-0,28	0,52	0,53	0,77	-0,19	1,09	-0,21	0,23	-0,79	-0,42	-0,11	-0,46	-1,40	-0,37	-0,71	-0,45	-0,35	0,48	-0,82	-0,50	-0,87	-0,11	-0,03	1,36	-0,38	-1,53	0,10	0,49	0,50
1971	0,48	0,50	0,71	0,87	2,08	0,76	1,32	1,22	0,68	0,13	0,47	1,58	1,34	-0,29	1,15	-1,21	1,18	1,41	1,06	-0,30	1,55	0,09	1,99	-0,11	1,68	1,19	0,57	1,26	0,59	0,47
1972	-0,79	-0,33	-0,31	-0,65	-0,32	0,50	0,90	1,76	1,72	0,30	-0,03	-0,04	-0,41	-0,70	0,09	1,55	0,69	-0,24	0,08	2,64	0,89	2,94	0,89	1,66	0,22	-0,38	0,80	1,57	0,95	-0,29
1973	0,83	1,13	1,30	0,92	-0,48	-0,94	-0,42	-0,27	-0,63	0,37	-0,38	-0,85	-1,15	-0,64	-0,49	-0,72	-0,68	-0,25	1,43	-1,42	0,27	0,39	-0,65	-1,57	-0,64	-1,30	-0,61	-0,98	-0,62	1,29
1974	-0,02	-0,70	-0,16	0,21	-0,64	-0,46	-0,54	-0,80	-0,17	0,18	0,60	0,25	-0,30	-0,44	0,07	1,20	0,41	-0,40	0,33	0,08	0,87	-0,38	1,00	0,35	0,43	-0,22	-1,07	-0,54	0,24	-0,64
1975	0,36	1,88	1,28	1,09	0,32	-0,48	-0,36	0,59	1,14	0,57	0,69	-0,64	1,07	0,17	0,82	1,47	0,31	1,95	1,54	0,00	0,27	0,67	1,96	0,27	0,34	0,80	0,70	0,56	0,32	2,93
1976	-0,43	0,20	-0,78	-0,18	0,09	-0,50	-0,87	0,30	0,76	0,16	0,57	-0,46	1,81	0,71	0,33	-0,15	0,88	0,05	-0,79	0,37	0,44	-0,56	1,20	0,85	-0,20	0,83	-0,26	-0,14	-0,56	-0,79
1977	1,97	-0,37	-0,88	-1,01	0,33	0,07	0,08	-0,17	0,64	-0,86	-1,04	-1,37	-0,09	-0,46	-0,55	-1,22	-0,38	0,74	0,68	-0,51	0,14	-1,09	0,87	0,43	0,79	0,08	0,31	0,03	0,40	-0,05
1978	0,49	0,83	0,51	1,68	2,12	1,25	0,93	-0,09	-0,24	0,49	-0,46	-1,17	-0,74	-0,61	-0,25	-0,41	0,38	1,20	1,51	1,87	-0,03	0,04	1,08	0,49	0,74	1,26	1,57	1,45	1,41	-0,19
1979	1,17	0,97	0,35	1,83	0,41	1,06	1,86	0,71	0,84	0,96	0,32	0,46	1,12	1,42	0,54	0,38	1,24	0,46	0,93	-0,09	-0,09	0,46	-0,29	1,03	-0,90	0,39	0,72	0,05	0,51	0,38
1980	-0,18	-0,93	-0,62	-0,70	-0,80	-1,12	-0,89	-0,88	-0,97	-0,61	-1,18	-1,47	-1,03	-0,43	-1,15	-1,03	-0,90	-0,94	-0,38	-1,01	0,65	-0,83	0,05	-0,36	-0,82	-1,37	-1,21	-0,64	-0,89	-0,64
1981	0,13	-0,32	-0,43	-0,85	0,82	0,94	-0,04	1,84	0,03	0,60	0,94	1,52	1,55	2,29	1,01	0,25	2,00	1,33	-0,80	0,87	0,43	1,15	0,05	1,52	-0,80	1,01	0,58	0,15	-0,77	1,78
1982	-1,25	-1,38	-1,23	-0,70	-1,11	-1,67	-0,49	-0,96	-1,00	-1,38	-1,30	-0,99	-0,82	-1,46	-1,37	-1,43	-0,89	-0,99	-1,47	-1,10	-1,14	-1,06	-1,33	-1,22	-1,71	-1,10	-0,92	-1,37	-1,86	-0,78
1983	-0,94	0,09	0,17	-2,00	-0,92	-0,89	-0,36	-1,02	-1,41	-1,40	-0,86	-0,79	-0,74	-1,55	-1,18	-1,46	-1,40	-0,76	1,37	-1,24	-0,65	-0,96	-1,01	-0,40	-0,71	-1,46	-0,44	-1,50	-0,97	-0,46
1984	1,67	0,62	1,11	1,12	1,20	1,34	0,82	-0,78	-1,11	1,69	0,19	0,57	1,12	-0,51	1,38	-0,41	1,34	1,50	1,62	0,27	0,14	0,62	-0,86	1,14	-0,35	1,16	0,73	0,25	1,30	0,85
1985	0,02	-0,48	-0,17	0,15	-0,35	-0,33	-0,14	-0,87	-1,49	0,25	1,37	1,51	0,55	0,19	0,22	0,73	-0,39	-0,53	-0,26	-0,89	-0,59	-0,41	-0,12	1,25	-0,37	-0,65	-0,48	-0,11	-0,30	0,04
1986	-0,10	0,01	-0,71	0,00	0,54	0,81	0,68	0,43	-0,87	-1,26	-0,85	-0,87	-0,39	-0,61	-1,08	-0,94	-0,75	0,50	-0,31	-0,07	-1,02	-0,21	0,05	-0,15	-0,31	0,39	0,82	0,31	0,36	-0,61
1987	-0,12	-0,21	-0,88	-0,43	-1,06	-0,79	-0,88	-0,88	-0,03	-0,97	-0,94	-1,00	-0,68	-0,43	-1,13	-0,40	-0,45	-0,73	-0,55	-0,75	-1,60	0,24	-1,02	1,67	-1,19	-0,66	-0,91	-1,43	-1,51	-1,20
1988	-0,52	-0,05	-0,35	0,58	-0,77	-0,92	-0,11	-0,55	0,06	-0,41	-1,28	-0,93	-1,02	-0,05	-0,41	0,16	-1,67	-0,99	0,20	-1,02	0,63	-1,03	-1,48	-0,75	-1,06	-0,93	-0,56	-1,18	-0,34	-0,90
1989	0,15	0,46	0,23	-1,20	-0,63	-0,54	-1,64	-0,52	1,43	1,39	1,01	1,38	1,21	0,68	2,43	1,50	0,75	-0,63	0,24	-1,45	2,34	0,58	-0,12	0,04	0,33	-1,04	-0,70	-0,67	-1,22	-0,10



Annexe V. 3 (Suite) : Calcul du SPI-03 pour chaque station

Année	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30
1990	-0,09	0,01	-0,52	-1,07	0,34	1,69	0,16	-0,82	1,15	0,30	-0,43	0,15	2,03	1,88	1,69	1,86	0,37	0,68	0,04	1,30	1,19	1,30	2,00	0,28	1,83	0,39	1,12	0,97	0,03	0,12
1991	0,72	1,23	2,55	1,63	2,85	1,70	1,84	1,06	-0,10	0,90	0,73	1,13	0,52	0,59	0,93	2,74	2,02	2,31	1,57	1,29	0,06	0,28	1,01	0,55	1,00	1,99	2,57	0,93	2,17	0,91
1992	-0,98	-0,27	-0,09	-0,69	-0,34	0,35	-0,08	-0,25	-0,41	-0,55	-0,50	-0,44	-0,28	-0,73	-1,05	-0,58	-1,20	-1,10	-1,01	-0,13	-1,30	-1,04	-1,38	0,96	-1,01	-0,47	-0,45	-0,32	0,80	-0,77
1993	-1,05	-1,49	-1,48	-1,48	-0,82	-1,29	-0,87	-1,76	-1,01	-1,22	-0,88	-0,63	-0,59	-1,11	-0,86	0,20	-1,57	-1,38	-1,44	-1,36	-1,69	-0,60	-1,66	-0,32	0,01	-1,39	-1,29	-1,56	1,23	-1,38
1994	-1,14	-0,30	-0,28	0,11	-0,41	-0,48	-0,96	-1,44	-1,08	-0,93	-0,41	-0,98	-1,21	-0,75	-1,08	-0,84	-0,60	-0,61	-0,04	-0,49	-0,74	-1,00	-0,36	-1,16	-0,22	0,73	-0,44	-0,49	0,57	-0,63
1995	1,18	0,19	0,88	-0,66	0,29	0,42	0,36	1,28	1,71	1,15	-0,04	0,48	0,63	0,28	0,43	1,37	0,42	0,12	0,76	1,39	-0,21	0,48	-0,34	-1,13	-2,37	-0,62	0,19	1,77	0,65	0,82
1996	-1,55	-1,62	-1,29	-1,30	-0,91	-1,25	-2,16	0,84	-1,13	-0,80	-0,56	-0,49	-0,98	-0,20	-0,84	-0,50	-1,45	-1,02	-1,27	-0,51	-0,42	-0,37	-0,94	0,09	-0,58	-1,28	-1,30	-0,95	1,67	-0,76
1997	2,77	1,10	1,10	0,71	-0,40	0,57	-0,24	-0,32	-0,34	-0,29	0,14	0,07	-0,17	0,05	-0,28	-0,34	0,01	0,00	1,53	0,64	-0,63	-0,52	-0,81	-1,08	1,63	0,08	-0,43	0,25	0,24	0,10
1998	-0,59	-1,52	-1,14	-1,14	-0,77	-0,14	-0,76	-0,81	-0,98	-1,45	-0,99	-0,57	-1,16	-0,50	-0,92	-0,54	-0,70	-1,15	-1,49	-0,57	-0,62	-1,31	-0,49	-1,52	1,16	-0,49	0,00	0,69	0,54	-1,64
1999	-1,74	-1,30	-1,29	-0,63	-0,22	0,41	1,08	0,55	0,48	-0,22	-0,14	-0,62	-0,14	-0,05	-1,23	-1,02	-0,77	-0,76	-1,10	0,46	-0,28	1,02	0,04	-0,51	0,03	0,32	0,00	1,49	0,03	-0,27
2000	-0,93	-1,45	-0,92	-0,90	-1,45	-1,22	-0,82	-0,90	-0,81	-1,18	-0,96	-1,13	-1,12	-0,58	-0,98	-0,66	-0,59	-1,02	-1,70	-0,49	-1,31	-0,89	-0,68	-1,50	-1,04	-0,73	-0,60	-0,61	0,97	-1,25
2001	-1,18	-1,19	-1,36	-0,11	-1,51	-1,79	-1,52	-0,62	-0,86	-1,38	-0,87	-0,51	-1,16	-1,43	-0,64	-0,73	-1,04	-1,71	-1,36	-0,83	-1,12	-0,98	-0,21	-1,37	-0,17	-1,43	-1,61	-1,49	0,72	-1,73
2002	0,08	1,16	-0,18	-0,41	0,29	0,23	-0,68	0,72	-1,05	0,69	0,55	0,68	-0,72	-0,07	0,84	0,87	0,54	0,16	-0,21	0,74	0,49	-0,09	1,13	-1,07	1,14	0,95	0,77	0,58	0,21	1,08
2003	0,60	0,81	0,95	0,85	0,99	0,89	1,05	-0,10	-0,05	1,93	2,57	1,75	1,24	1,67	2,10	1,14	1,70	0,51	0,29	1,21	-0,38	-0,02	-0,27	1,87	0,51	1,30	1,25	0,65	0,77	1,65
2004	-0,85	-0,84	-0,26	0,70	0,03	-0,06	0,29	0,74	0,24	-1,38	-0,93	-1,03	-1,29	-0,78	-0,83	-0,48	-0,81	-0,62	-0,84	-0,68	0,02	-0,85	-1,14	-0,63	-0,50	-0,29	-0,15	-0,28	0,17	-0,87
2005	-0,84	-0,82	-1,16	-0,94	-1,47	-1,46	-1,53	-0,96	-0,99	1,21	1,80	1,40	0,18	1,99	0,85	0,27	-0,06	-0,02	-1,28	-0,28	1,83	-0,17	0,57	1,08	0,04	-0,50	-0,91	-1,62	1,49	0,19
2006	1,52	2,23	1,78	0,54	-0,36	1,67	1,67	2,16	2,08	0,45	1,21	0,73	1,14	0,67	-0,26	0,05	0,79	1,27	0,35	1,35	1,24	1,74	0,57	0,22	0,64	2,27	1,94	1,28	1,39	1,13
2007	0,81	1,99	1,90	1,64	0,41	0,02	1,14	0,94	0,66	0,54	-0,69	1,11	-0,31	0,52	0,31	0,30	0,13	0,84	0,08	0,00	1,69	0,11	0,69	1,04	1,22	0,84	-0,04	0,09	0,62	0,77
2008	-0,12	0,08	0,77	1,55	1,42	1,83	1,02	1,86	1,77	2,00	2,66	2,10	1,73	1,95	1,20	0,32	1,50	1,53	0,19	1,49	0,86	2,77	1,23	-1,15	1,27	1,13	1,70	1,85	2,01	0,40
2009	0,49	0,41	0,27	0,32	0,47	0,00	0,09	-1,01	1,09	0,79	0,29	0,22	-0,31	0,76	0,53	-0,53	0,04	-0,31	0,06	0,05	-1,69	0,40	-1,13	-0,72	-1,42	-0,39	-0,42	-0,39	1,11	0,56