



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي – الشلف –

Université Hassiba Ben Bouali – Chlef –

معهد العلوم الزراعية

L'institut des sciences Agronomiques

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magistère

Spécialité : Hydraulique Agricole

Option : Irrigation et Gestion de l'eau

## THEME

*Impact des contraintes climatiques sur l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, bassin versant de la Mina. (W. de Relizane).*

Présenté par : M<sup>lle</sup>. LAMRANI Chérifa

Devant le jury :

Président	Dr. BOUTHIBA A.	Maître de Conférences A.	U.H.B.Chlef
Promoteur	Dr. ACHITE M.	Maître de Conférences A.	U.H.B.Chlef
Examineurs	Pr. DOUAOUI A.	Professeur	C.U.Khemis Miliana
	Dr. NEDJAI S.	Maître de Conférences B.	U.H.B.Chlef
	Mr. BRADAI H.	Maître Assistant A.	U.H.B.Chlef

Année universitaire

2011-2012

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier en premier lieu Mr SAIDI Djamel, professeur à l'université de Chlef pour l'ouverture de l'option de Magistère "Irrigation et gestion de l'eau";*

*Je remercie également, Monsieur ACHITE Mohammed: Maitre de conférence A à l'U.H.B.Chlef d'avoir accepté de diriger mon travail;*

*Un grand Merci aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail: Mr. BOTHIBA A. (Maître de Conférences A. à l'université de Chlef), Mr. DOUAOUI A. (Professeur au centre universitaire de Khemis Miliana), Mr. NADJAÏ S. (M.C.B. à l'université de Chlef) et Mr. BRADAÏ H. (M.A.A. à l'université de Chlef);*

*Un merci particulier à toute ma famille qui m'a accompagné dans ce long parcours, aux personnes qui ont contribué à rendre mes années d'étude à Chlef inoubliables en particulier: promotion 2009/2010 options: irrigation et gestion de l'eau et Ecologie et environnement.*

*Mes vifs remerciements à l'être qui m'est très cher, mon mari M'hend, qui à toujours été présent à mes cotés.*

*Remerciements*

*Table des matières*

*Résumé*

*ملخص*

*Abstract*

*Liste des abréviations*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Table des matières*

Introduction générale 1

*CHAPITRE I: Cadre général de l'étude*

I-1 Le cadre géographique.....	3
I-2 Caractéristiques générales de la zone d'étude .....	4
I-2-1 Contexte géologique .....	4
I-2-2 Relief.....	7
I-2-3 Couvert végétal.....	8
I-2-4 Climatologie .....	9
I-2-4-1 La pluviométrie.....	9
I-2-4-1-1 Les stations pluviométriques .....	9
I-2-4-1-2 Les précipitations .....	10
I-2-4-2 Les températures .....	11
I-2-4-3 Les vents.....	12
I-2-4-4 Humidité relative .....	12
I-2-4-5 Le bilan hydrologique .....	13
I-2-4-6 Indices climatiques.....	15

I-2-4-6-1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson .....	15
I-2-4-6-2 Indice d'aridité de De Martonne .....	16
I-2-4-6-2-1 Définition de l'aridité.....	16
I-2-4-6-2-2 Indice d'aridité annuelle de De Martonne .....	16
I-2-4-6-2-3 Indice d'aridité mensuelle de De Martonne .....	17
I-3 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques .....	18
I-3-1 Caractéristiques Physiques du bassin versant de la Mina .....	18
I-3-1-1 Caractéristiques géométriques .....	18
I-3-1-2 Caractéristiques morphologiques.....	18
I-3-1-2-1 Paramètres de forme .....	18
I-3-2 Réseau hydrographique.....	21
I-4 Barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda .....	22
I-5 Source de pollution dans la zone d'étude .....	23

## ***CHAPITRE II: Etude des précipitations dans le bassin versant de la Mina***

II-1 Collecte et mise en forme des données .....	26
II-1-1 Réseau pluviométrique et données utilisées .....	26
II-1-2 Comblement des lacunes .....	27
II-2 Analyse du régime pluviométrique .....	28
II-2-1 Analyse de la variabilité mensuelle des précipitations et étude du régime saisonnier	28
II-2-1-1 Précipitations mensuelles.....	28
II-2-1-2 Régime pluviométrique saisonnier .....	29
II-2-2 Analyse du régime annuel.....	30
II-2-2-1 Variabilité relative des pluies annuelles .....	30
II-2-2-2 Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée sur l'ensemble du bassin versant. ....	32
II-2-2-3 Analyse en composantes principales des cumuls annuels .....	33

II-2-2-3-1 Résultats de l'A.C.P.....	34
II-2-2-4 Détection de ruptures au sein des séries pluviométriques .....	37
II-2-2-4-1 Test de Pettitt .....	38
II-2-2-4-2 Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN .....	38
II-2-2-4-3 Statistique U de Buishand .....	39
II-2-2-4-4 Segmentation de Hubert .....	39
II-2-2-4-5 Calcul des variations moyennes.....	40
II-2-2-4-6 Analyse des résultats .....	41

***CHAPITRE III: Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina***

III-1 Généralités sur la sécheresse .....	43
III-1-1 Définition de la sécheresse .....	43
III-1-2 Les différents types de sécheresse .....	43
III-1-2-1 La sécheresse météorologique .....	44
III-1-2-2 La sécheresse agricole .....	44
III-1-2-3 La sécheresse hydrologique .....	44
III-1-2-4 La sécheresse socioéconomique.....	45
III-1-3 La relation entre les différents types de sécheresse .....	45
III-1-4 Les impacts et les risques de la sécheresse.....	46
III-1-4-1 Les impacts économiques.....	46
III-1-4-2 Les impacts environnementaux.....	47
III-1-4-3 Les impacts sociaux.....	47
III-1-5 L'évaluation de la sécheresse .....	47
III-1-5-1 Indice de l'écart à la moyenne (Em) .....	48
III-1-5-2 Indice de pourcentage à la normale (PN) .....	48
III-1-5-3 Indice de pluviosité (IP).....	48

III-1-5-4 Rapport à la normale des précipitations (RN).....	48
III-1-5-5 Indice des Déciles de précipitation (DI).....	49
III-1-5-6 Indice de sécheresses de Palmer (PDSI).....	49
III-1-5-7 L'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).....	49
III-1-6 Quelques travaux réalisés dans le monde pour la caractérisation de la sécheresse par l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).....	50
III-1-6-1 EN Asie.....	50
III-1-6-2 En Amérique.....	51
III-1-6-3 En Europe.....	52
III-1-6-4 En Afrique.....	54
III-2 Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina par l'indice SPI ....	56
III-2-1 Intérêt et choix de l'indice standardisé des précipitations.....	56
III-2-2 Définition et méthodes de calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).....	57
III-2-3 Etude des périodes sèches et humides dans le bassin versant de la Mina.....	60
III-2-3-1 Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-annuel dans l'ensemble du bassin versant de la Mina.....	60
III-2-3-1-1 La répartition spatiale des épisodes secs et humides dans le bassin versant.....	60
III-2-3-1-2 La répartition temporelle des épisodes secs et humides sur la période étudiée.....	63
III-2-3-1-3 La répartition spatio-temporelle des classes humides et sèches dans l'ensemble du bassin versant de la Mina pour la période allant de 1970 à 2009. ....	65
III-2-3-2 Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-3 pour la station de SMBA (S16).....	68

## ***CHAPITRE IV: Evaluation de la qualité des eaux du barrage SMBA***

IV-1 Caractéristiques générales des eaux naturelles.....	71
IV-1-1 Eaux souterraines.....	71

---

IV-1-2 Eaux superficielles .....	71
IV-1-2-1 Pollution des eaux de surface.....	72
IV-1-2-2 Différents types de polluants .....	74
IV-1-2-3 Classes de qualité des eaux du surface .....	74
IV-1-2-4 Le phénomène d'eutrophisation des eaux de surface .....	75
IV-1-3 Qualité de l'eau d'irrigation .....	76
IV-1-3-1 Caractéristiques physiques .....	76
IV-1-3-2 Caractéristiques chimiques .....	77
IV-1-3-3 Autres éléments.....	78
IV-1-3-4 Caractéristiques biologiques .....	79
IV-1-4 Classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation.....	79
IV-1-5 Le contrôle des résultats d'une analyse d'eau par la méthode du bilan ionique.....	82
IV-2 Caractérisation des eaux de barrage 'Sidi M'hamed Ben Aouda' .....	82
IV-2-1 Prélèvement et méthodes d'analyse .....	83
IV-2-2 Contrôle des résultats obtenus par la méthode du bilan ionique .....	84
IV-2-3 Hydroclimatologie de la zone d'étude.....	85
IV-2-3-1 Variation de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI-3) et de l'indice d'aridité (I).....	85
IV-2-3-2 Evolution du volume de la retenue du barrage et de l'évaporation .....	86
IV-2-4 Interprétation des résultats d'analyse de la qualité des eaux du barrage SMBA ...	87
IV-2-4-1 Qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA.....	87
IV-2-4-2 Qualité Physico-chimiques des eaux du barrage .....	89
IV-2-4-3 L'évolution des éléments chimiques.....	91
IV-2-4-4 Faciès chimiques .....	95
IV-2-4-5 Origine de la minéralisation des eaux .....	96
IV-2-4-5-1 Corrélation entre les ions .....	97
IV-2-4-5-2 Evolution des minéraux et des éléments dissous .....	98

IV-2-4-6 Evolution des paramètres organiques et de l'oxygène dissous .....	99
IV-2-4-7 Evolution des paramètres azotés et de l'oxygène dissous.....	102
IV-2-4-8 Aptitude des eaux du barrage SMBA à l'irrigation .....	105
IV-2-5 Impact des contraintes climatiques sur l'évolution de la qualité des eaux du barrage SMBA .....	106
IV-2-5-1 Evolution de la conductivité électrique et du SPI-3 sur la période 1985 à 2010.....	107
IV-2-5-2 Evolution de l'anion Cl <sup>-</sup> , du cation Na <sup>+</sup> et du SPI-3 sur la période 1985 à 2010.....	107
IV-2-5-3 Evolution des sulfates et du SPI-3 sur la période 1985-2010.....	108
IV-2-5-4 Evolution de la DBO <sub>5</sub> , DCO et du SPI-3 sur la période allant de 1985 à 2010.	108
IV-2-5-5 Evolution de l'ammonium, des nitrates et du SPI-3 sur la période allant de 1985 à 2010 .....	109
Conclusion générale	111

*Références bibliographiques*

*Annexe*



## *Résumé*

Connaître l'évolution et la variabilité récente du climat dans les régions arides et semi arides est une nécessité pour anticiper ce que pourraient être les conséquences sur les milieux et sur les sociétés de ces régions, et ainsi définir des stratégies d'adaptation durables.

Dans ce travail, on étudie l'évolution du régime pluviométrique dans le bassin versant de la Mina (4900 km<sup>2</sup>), situé dans une région semi-aride de l'Algérie du Nord, et on tente d'évaluer son impact sur l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda implanté dans le cours principal de l'oued Mina. Les ruptures sont détectées au cours de la période de mesures la plus complète disponible: 1970-2009. On diagnostique par ailleurs les années sèches et humides par application de l'Indice Standardisé des Précipitations (ISP). La qualité des eaux du barrage est évaluée par une étude des paramètres physico-chimiques, chimiques et de pollution mesurés sur la période comprise entre 1985 et 2010.

Les données de 16 stations pluviométriques, géographiquement représentatives de la zone d'étude sont traitées. Il ressort que le bassin se caractérise par deux ruptures pluviométriques majeures survenues au début des années 1980 et pendant l'année 2007. Ces deux ruptures ont engendré respectivement un déficit de l'ordre de 51% et un excès de près 90%. L'application de l'ISP aux cumuls annuels a spécifié cinq années exceptionnellement sèches, à savoir **1981/1982, 1989/1990, 1992/1993, 1993/1994 et 1998/1999**. L'étude de la qualité des eaux du barrage à montrer une dégradation vis-à-vis les paramètres Sodium (Na<sup>+</sup>), Chlorure (Cl<sup>-</sup>), Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>), Demande biochimique en Oxygène (DBO<sub>5</sub>), Demande chimique en oxygène (DCO), Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>).

En fin, dans le souci de préserver l'eau du barrage contre la pollution et d'en assurer la gestion rationnelle, il est souhaitable de prendre les mesures suivantes:

- En matière de gestion des eaux usées, il nous semble que la première action à envisager est de réaliser des stations d'épurations aux quelles il faut raccorder les réseaux d'égouts collectifs pour toutes les agglomérations;
- Dans le but de prévenir l'envasement du barrage il faut prendre des mesures anti-érosives, en particulier, dans la zone marneuse de Nord.

**Mots clés:** Contraintes climatiques, sécheresse, ISP, aridité, bassin versant, qualité des eaux, irrigation.

## ملخص

التعرف على التغيرات المعاصرة للمناخ في المناطق الجافة و شبه الجافة قد أصبح في الوقت الحالي ضرورة حتمية من أجل الاستعداد للنتائج التي قد تتعرض لها مجتمعات هذه المناطق. يعتبر هذا العمل مساهمة في دراسة نظام الأمطار إلى جانب تحديد تطور و تخصيص الفترات الرطبة و الجافة و تأثيرها على نوعية المياه في سد سيدي محمد بن عودة.

إن دراسة الأمطار السنوية من خلال 16 محطة لقياس المغيائية موزعة بشكل منتظم داخل حوض واد مينا و التي تمتد على الفترة 1970-2009 قد بينت أن هناك انقطاعين. الأول وقع في بداية الثمانيات و الثاني خلال عام 2007 حيث أن هذا الأخير قد تميز بارتفاع في المغيائية بمعدل % 90 في حين أن الانقطاع الأول قد تميز بانخفاض يفوق % 50. الدراسة التحليلية للجفاف و خواصه بواسطة مؤشر الهواطل المعياري سلم عام SPI-annuel المقترح من طرف 1993 McKee بينت بصفة عامة أن حوض مينا قد تعرض للجفاف خلال الأعوام (1982-1981) (1989-1990) (1992-1993) (1993-1994) (1998-1999). دراسة نوعية المياه قد بينت تراجع من حيث  $(Na^+)$ ,  $(Cl^-)$ ,  $(SO4^{2-})$ ,  $(DBO5)$ ,  $(DCO)$ ,  $(NH4^+)$ ,  $(NO2^-)$

من أجل حماية مياه سد سيدي محمد بن عودة من التلوث يجب تصريف المياه القذرة و القيام بعمليات التشجير من أجل تفادي انجراف التربة في حوض مينا.

## الكلمات مفتاح

نوعية المياه, حوض مينا , SPI , جفاف, العوامل المناخية

*Abstract*

To know the evolution and the recent variability of the climate in the arid and semi arid regions is a need to anticipate what could be the consequences on the mediums and the companies of these areas, and thus to lay down strategies of durable adaptation.

In this work, we study the recent evolution in the pluviometric regime in the Mina Basin, a semi-arid region in Algeria and we estimate its impact on the evolution of water quality to Sidi M'hamed Ben Aouda dam. We detect the breaks during the period of most complete measurement: 1970-2009. In addition, we diagnose the dry and non-dry years by applying the standardized Precipitation Index (SPI). The water quality of the dam is evaluated by a study of the physicochemical, chemical and pollution parameters measured over the period ranging between 1985 and 2010.

We treated the data of 16 climatological, geographically representative posts of the zone of study. It arises that the basin is characterized by two major pluviometric breaks, in the beginning of the decade 1980 and during the year 2007. These two ruptures generated respectively a deficit of about 51% and on excess of close to 90%. The application of the SPI to the annual rainfall data specified five years exceptionally dry, namely **1981/1982, 1989/1990, 1992/1993, 1993/1994 and 1998/1999**. The study of the water quality revealed that the average contents of ( $\text{Na}^+$ ), ( $\text{Cl}^-$ ), ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), (DBO5), (DCO), ( $\text{NH}_4^+$ ), ( $\text{NO}_2^-$ ), show rates which exceeds to the standard.

In end, with the aim of preserve the water Quality of the dam SMBA against pollution and to ensure rational management of it, it is desirable to take following measurements:

-It seems to us that the first action to be considered is to carry out stations of purifications for which it is necessary to connect the collective sewerage systems for all the agglomerations;

-With an aim of preventing the silting of the dam it is necessary to take anti-erosive measures, in particular, in the marly zone of North.

**Key words:** Climatic constraints, drought, SPI, aridity, rainfall, water quality,

*Liste des abréviations utilisées*

**ABH -CZ:** Agence du Bassin Hydrographique Cheliff-Zahrez

**AEP:** Alimentation en eau potable;

**ANRH:** Agence nationale des ressources hydrauliques;

**CCD:** Convention sur la lutte contre la Désertification;

**NCDC:** *National Climatic Data Center*

**DNMC:** *National Drought Mitigation Center* (Centre national de surveillance de la sécheresse);

**FAO:** Organisation mondiale de l'agriculture et de l'alimentation

**IRD:** Institut de Recherche pour le Développement, l'Université de Montpellier et l'École des Mines;

**ONM:** Office national de la météorologie

**OMM:** Organisation mondiale de la météorologie;

**OSS:** Observatoire du Sahara et du Sahel;

**D:** *Precipitation deciles*;

**PDSI:** *Palmer Drought Severity Index*;

**SPI:** *Standardized Precipitation Index*, (Indice Standardisé des Précipitations).

**BV:** Bassin versant;

**SB:** Sous bassin versant;

**DJF:** Décembre, Janvier et Février;

**MAM:** Mars, Avril et Mai;

**JJA:** Juin, Juillet et Aout;

**SON:** Septembre, Octobre et Novembre.

**ANRH:** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

**ACP:** Analyse en Composantes Principales

**CV:** Coefficient de Variation

**DA:** Déficit Agricole

**ETP:** Evapotranspiration Potentielle

**ETR:** Evapotranspiration Réelle

*Liste des figures*

<b>Figure 1:</b> Situation générale de la zone d'étude.....	3
<b>Figure 2:</b> Situation géographique du bassin versant de la Mina. ....	4
<b>Figure 3:</b> Carte géologique du bassin versant de l'oued Mina. ....	6
<b>Figure 4:</b> La carte des pentes du bassin versant de la Mina. ....	8
<b>Figure 5:</b> Carte de la couverture végétale du bassin versant de la Mina. ....	9
<b>Figure 6:</b> Précipitations moyennes mensuelles à la station étudiée (période 1978-2010). ....	11
<b>Figure 7:</b> Températures moyennes mensuelles de l'air (maximales, minimales et moyennes) enregistrées à la station étudiée Pour la période (1978-2010). ....	12
<b>Figure 8:</b> Variation de l'évapotranspiration et des précipitations mensuelles à la station de SMBA pour la période (1978-2010).....	14
<b>Figure 9:</b> Diagramme ombrothermique de la station SMBA pour la période (1978/2010)...	15
<b>Figure 10:</b> Le réseau hydrographique de l'oued Mina et limites des sous bassins versants. .	23
<b>Figure 11:</b> Situation des stations pluviométriques et leurs zones d'influences. ....	27
<b>Figure 12:</b> Variation des précipitations moyennes mensuelles, période (1970-2010) à la station S16.....	29
<b>Figure 13:</b> Précipitations moyennes saisonnières pour la période (1970/2010). ....	29
<b>Figure 14:</b> La variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de l'oued Mina.....	32
<b>Figure 15:</b> Histogramme de décroissance des seize valeurs propres.....	35
<b>Figure 16:</b> Projection des variables sur le plan factoriel (CP1-CP2).....	36
<b>Figure 17:</b> Projection des observations actives sur le plan factoriel (CP1). ....	37
<b>Figure 18:</b> Variation des valeurs de CP1 sur la période 1970/2009.....	37
<b>Figure 19:</b> Identification de la période des ruptures entre 1970 et 2009. ....	42
<b>Figure 20:</b> Les différents types de la sécheresse et leurs impacts (Ameziane et al., 2007). ..	46
<b>Figure 21:</b> Histogramme de la somme des classes humides et sèches du SPI-annuel pour chaque station durant la période étudiée.....	63
<b>Figure 22:</b> L'évolution du SPI sur la période d'étude de chacune des stations étudiées. ....	64
<b>Figure 23:</b> Pourcentage de stations météorologiques indiquant des valeurs du SPI $\leq (-1)$ et $\geq (1)$ . ....	65
<b>Figure 24:</b> Répartition géographique des classes du SPI-annuel, de chaque station et pour chaque année, sur la période d'étude dans le bassin versant de la Mina. ....	66/66

<b>Figure 25:</b> Evolution du SPI-annuel et SPI-3 pour les quatre saisons à la station S16 pour la période 1971/2010.....	69
<b>Figure 26:</b> Diagramme de RIVERSIDE. ....	81
<b>Figure 27:</b> Evolution de l'Indice Standardisé des Précipitations ISP-3 pour les quatre saisons et l'indice d'aridité annuelle de De Martonne, pour la période 1985-2010.....	85
<b>Figure 28:</b> Variations saisonnières du volume de la retenue du barrage SMBA et de l'évaporation sur la période 1985/2010.....	86
<b>Figure 29:</b> Fiche de la qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA pour la période (1985-2010).....	88
<b>Figure 30:</b> Variation saisonnière des paramètres physico-chimiques sur la période 1985/2010.	90
<b>Figure 31:</b> Evolution saisonnière de la conductivité électrique et des éléments chimiques sur la période 1985/2010. ....	92
<b>Figure 32:</b> Facies chimiques de l'eau d'après le diagramme de Piper.....	96
<b>Figure 33:</b> Variation de $(\text{Na}^+ + \text{Mg}^+ + \text{K}^+)$ en fonction de $\text{Cl}^-$ .....	98
<b>Figure 34:</b> Variation de $(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$ en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{--})$ .....	98
<b>Figure 35:</b> Evolution saisonnière des paramètres organiques et de la saturation de l'eau sur la période 1985/2010.....	101
<b>Figure 36:</b> Evolution saisonnière des paramètres Azotés et de la saturation de l'eau sur la période 1985/2010.....	104
<b>Figure 37:</b> La projection des points sur le diagramme de REVERSIDE 1954 pour la période 1985/2010. ....	106
<b>Figure 38:</b> Evolution de la conductivité électrique et du SPI-3 sur la période 1985-2010..	107
<b>Figure 39:</b> Evolution de l'anion $\text{Cl}^-$ , du cation $\text{Na}^+$ et du SPI-3 sur la période 1985-2010..	107
<b>Figure 40:</b> Evolution des sulfates et du SPI-3 sur la période 1985-2010. ....	108
<b>Figure 41:</b> Evolution de la DBO5, DCO et du SPI-3 sur la période allant de 1985-2010...	109
<b>Figure 42:</b> Evolution de l'ammonium, des nitrates et du SPI-3 sur la période 1985-2010..	110

*Liste des tableaux*

<b>Tableau 1:</b> Lithologie du bassin versant de la Mina au droit du barrage SMBA.....	5
<b>Tableau 2:</b> La localisation de la station météorologique retenue. ....	10
<b>Tableau 3:</b> Précipitations moyennes mensuelles et leur contribution à la pluie moyenne annuelle de la station étudiée pour la période (1978-2010).....	10
<b>Tableau 4:</b> Températures moyennes mensuelles de l'air, (maximales, minimales et moyennes) pour la station étudiée, période (1978-2010) .....	11
<b>Tableau 5:</b> les moyennes mensuelles de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air enregistrées à la station étudiée pour la période (1978/2010).....	12
<b>Tableau 6:</b> Evapotranspiration potentielle à la station étudiée (1978-2010). ....	14
<b>Tableau 7:</b> Bilan hydrologique à la station de SMBA pour la période (1978-2010).....	15
<b>Tableau 8:</b> Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne. ....	17
<b>Tableau 9:</b> L'indice de DE MARTONNE annuel pour la station étudiée .....	17
<b>Tableau 10:</b> Indice d'aridité mensuelle de De Martonne pour la station étudiée. ....	18
<b>Tableau 11:</b> Répartition hypsométrique du bassin versant de la Mina.....	20
<b>Tableau 12:</b> Caractéristiques physiographiques du bassin versant étudié. ....	21
<b>Tableau 13:</b> Les agglomérations et leurs points de rejet d'eaux domestiques. ....	24
<b>Tableau 14:</b> Les stations pluviométriques retenues et leurs caractéristiques.....	26
<b>Tableau 15:</b> Précipitations moyennes mensuelles de la station S16 pour la période 1970/2010.	28
<b>Tableau 16:</b> Précipitations moyennes saisonnières à la station S16.....	29
<b>Tableau 17:</b> Pourcentage des régimes saisonniers à la station retenue. ....	30
<b>Tableau 18:</b> Les paramètres statistiques des précipitations annuelles, période (1970/2010) des stations étudiées.....	31
<b>Tableau 19:</b> Détermination de la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin versant de la Mina.....	33
<b>Tableau 20:</b> Valeurs propres, pourcentages de variance et pourcentages cumulés.....	34
<b>Tableau 21:</b> Coordonnées des variables actives sur les axes CP1 et CP2. ....	35
<b>Tableau 22:</b> Projection des observations actives sur le plan factoriel (CP1).....	36
<b>Tableau 23:</b> Tests statistiques, années de ruptures et variation dans les séries pluviométriques étudiées. ....	41
<b>Tableau 24:</b> Interprétation du SPI par rapport à ses valeurs et la probabilité associée au non dépassement selon Mck (1993).....	59

<b>Tableau 25:</b> Caractérisation de la sécheresse par l'indice (SPI-annuel) des différentes stations pluviométriques étudiées. ....	61
<b>Tableau 26:</b> Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI) à l'échelle de bassin versant de la Mina.....	62
<b>Tableau 27:</b> Les années sèches et humides dans le bassin versant de la Mina. ....	68
<b>Tableau 28:</b> Fréquence (en %) de l'indice de sécheresse (SPI-annuel) et (SPI-3) pour les quatre saisons à la station de Sidi M'hamed Ben Aouda (S16).....	69
<b>Tableau 29:</b> Principales différences entre les eaux souterraines et les eaux de surface. ....	72
<b>Tableau 30:</b> Différents types de polluants. ....	74
<b>Tableau 31:</b> Grille de la qualité physique, minérale et organique des eaux de barrages et des oueds.....	75
<b>Tableau 32:</b> classification des eaux selon le S.A.R.....	80
<b>Tableau 33:</b> Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C.....	80
<b>Tableau 34:</b> Les méthodes d'analyse physico-chimiques des eaux. ....	84
<b>Tableau 35:</b> Bilan ionique des eaux du barrage SMBA pour l'automne et l'hiver de l'année 2008. ....	84
<b>Tableau 36:</b> Variation des paramètres physico-chimiques des eaux du barrage SMBA. ....	89
<b>Tableau 37:</b> Variation des paramètres de la minéralisation globale des eaux du barrage SMBA.....	91
<b>Tableau 38:</b> Le pourcentage de chaque faciès chimique sur la période 1985/2010.....	95
<b>Tableau 39:</b> Variation des paramètres organiques et de l'oxygène dissous des eaux du barrage SMBA.....	99
<b>Tableau 40:</b> Variation des paramètres azotés et de l'oxygène dissous des eaux du barrage SMBA.....	102



## **Introduction générale**

L'eau est un bien patrimonial commun de l'humanité. La santé individuelle et collective en dépend, l'agriculture, l'industrie et la vie domestique y sont liées. Au cours de la dernière décennie, la problématique des changements climatiques a été reconnue comme l'un des problèmes majeurs du développement à l'échelle locale et régionale voire même à l'échelle internationale, aux côtés du développement durable, de la préservation et de la protection de l'environnement (**Khaldi, 2005**).

Les pays du Maghreb 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 liées aux déséquilibres importants des ressources en eau aussi bien quantitativement que qualitativement (**Meddi, 2009; Ellouze, 2008; Sebbar et al., 2011; Achite et al., 2012**). L'Algérie, est l'un des pays du bassin méditerranéen qui souffre de cette pénurie d'eau d'une saison à une autre, et d'une année à une autre (**Kettab, 2004**). Selon les auteurs **Achite et Touaibia (2007); Meddi (2007)**, ce pays a connu d'importantes et fréquentes sécheresses frappant de vastes étendues dans les zones intérieures et celles de l'Ouest. Le climat semi aride caractérisant ces régions fait que les ressources renouvelables en eau superficielle sont très irrégulières car elles sont situées dans des bassins hydrographiques où l'écoulement de l'eau est entièrement lié à la distribution spatiotemporelle des pluies (**Achite et al., 2012**).

Au niveau du bassin versant de la Mina, situé dans une région semi aride, caractérisé par une période sèche très longue et des précipitations souvent aléatoires, la construction du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda été une importante initiative pour la mobilisation des eaux de surface dans la région. Mais malheureusement, en plus de l'envasement précoce de part sa position par rapport à la zone des marnes (**Touaibia, 2005**) et la difficulté des contraintes climatiques qui accélère le phénomène, l'ouvrage est menacé d'une pollution par les eaux usées domestiques en provenance des populations riveraines qui rejettent leurs effluents dans le cours de l'oued Mina et ses affluents sans aucun traitement (**ABH-CZ, 2004**).

A travers cette étude relative au bassin versant de la Mina, nous allons tenter d'évaluer l'impact des contraintes climatiques sur la qualité des eaux du barrage SMBA.

Dans cette optique, le travail sera scindé en quatre chapitres, dont:

-Le premier concerne la présentation générale de la région d'étude du point de vue géographique, géologique, hydroclimatique et socio-économique;

-Le deuxième explicite l'étude des fluctuations du régime pluviométrique dans la vallée de la Mina, Il s'agit de détecter des ruptures, au cours de la période de mesure comprise entre 1970/1971 et 2009/2010, en utilisant des tests statistiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale. Pour ce faire, les données de 16 stations pluviométriques ont été traitées, ce qui a permis de constituer une base de données pluviométriques (1970-2010) géographiquement représentative de la zone d'étude.

-Le troisième est consacré à l'étude de la sécheresse dans le bassin versant par l'utilisation de l'Indice Standardisé des Précipitations appliqué à l'échelle annuelle pour l'ensemble des stations et à l'échelle saisonnière (SPI-3mois) pour la station de Sidi M'hamed Ben Aouda.

-Le dernier chapitre fera l'objet en premier lieu, d'une évaluation de la qualité des eaux du barrage par le suivi de la variabilité saisonnière des paramètres physico-chimiques, chimiques et de pollution sur la période allant de 1985 à 2010 et par la suite, on tente de dégager l'impact des épisodes secs et humides sur la dégradation de la qualité des eaux du barrage;

En fin, nous terminerons par une conclusion générale sur la base de laquelle nous formulerons quelques recommandations.

### I-1 Le cadre géographique

Situé au centre ouest de l'Algérie du nord, le bassin versant "Chélif-Zahrez" regroupe trois bassins hydrographiques : Le Chélif, le Zahrez et le côtier Dahra.

Le bassin du Chélif, qui s'étend sur une superficie de 43750 Km<sup>2</sup>, est le plus grand bassin versant de l'Algérie de nord. Il est drainé par l'oued Chélif qui prend sa source dans l'Atlas Saharien pour se jeter en méditerranée à environ **10 Km** à l'Est de Mostaganem (ABH-CZ, 2004). La vallée de Chélif est compartimentée à son tour en trois bassins versants (Figure 1):

- Le bassin de Chélif-amont du barrage de Boughzoul, Le bassin du haut et du moyen Chélif et Le bassin du bas Chélif et de la Mina.

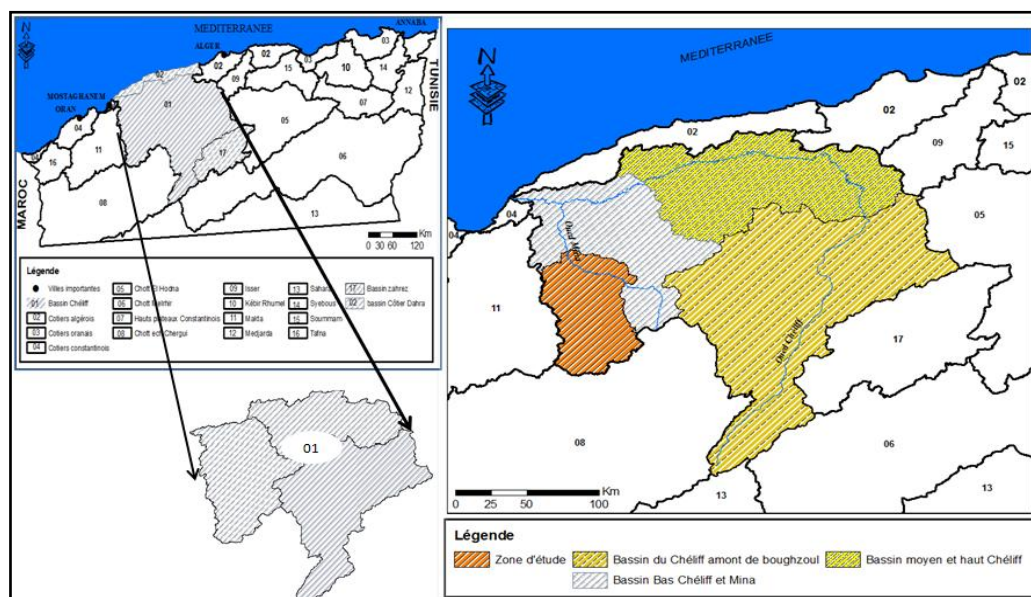


Figure 1: Situation générale de la zone d'étude.

Le bassin versant de la Mina est situé dans le troisième compartiment de la vallée de Chélif-le bassin de bas Chélif et de la Mina- entre 0° 20' et 1° 10' de longitude Est et 34° 40' et 35° 40' de latitude Nord (Figure 1). L'Oued Mina est parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff, il parcourt une distance d'environ **90 Km** entre les barrages Bakhada et Sidi M'hamed Ben Aouda avec une orientation SE-NO.

La superficie du bassin au droit du barrage S.M.B.A. est de **4900 Km<sup>2</sup>** (Touaibia, 2005) et comme le montre la figure 2, il chevauche sur quatre Wilayas: Relizane, Mascara, Saida et Tiaret, Il est limité:

-Au Nord-Est par les monts de l'Ouarcenis;

- Au Nord-Ouest par les monts des Beni Chaugrane;
- A l'Ouest par les monts de Saïda;
- Au Sud-Est par les monts de Frenda;
- Au Sud par les hauts plateaux.

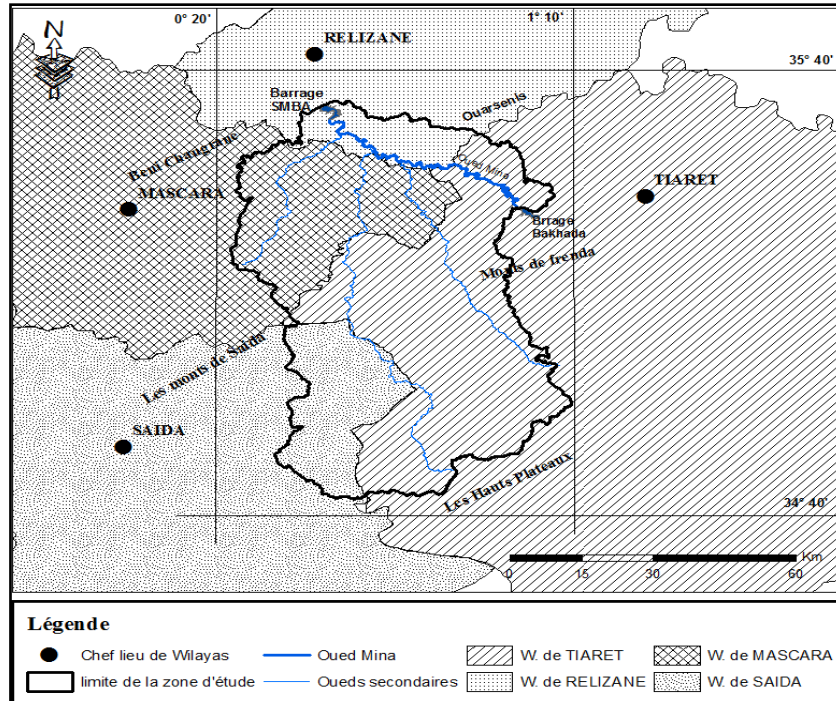


Figure 2: Situation géographique du bassin versant de la Mina.

## I-2 Caractéristiques générales de la zone d'étude

### I-2-1 Contexte géologique

La géologie de la région est caractérisée par des terrains appartenant à l'ère Tertiaire et Secondaire. Le bassin versant de la Mina est dominé par du Jurassique (**66,28 %** de la superficie totale), il est implanté dans presque toute la partie centrale et sud (**figure 3**). La partie nord est essentiellement marquée par des terrains de Néogène et de Paléogène (Pliocène, Miocène, Oligocène et Eocène) avec une portion de **27,97 %** de la superficie totale. Le reste de la région est constitué principalement par du Crétacé et du Trias (**5,58%**).

Le bassin versant étudié est également découpé par une série de failles d'orientation Sud-Ouest et Nord-Est (**Figure 3**). Selon **Pitaud (1976)**, la tectonique cassante des formations dolomitiques apparait nettement sur la plus grande partie du bassin de l'oued Abd par des failles visibles disposées en croix et en grande densité en amont de la source Ain Makhlouf.

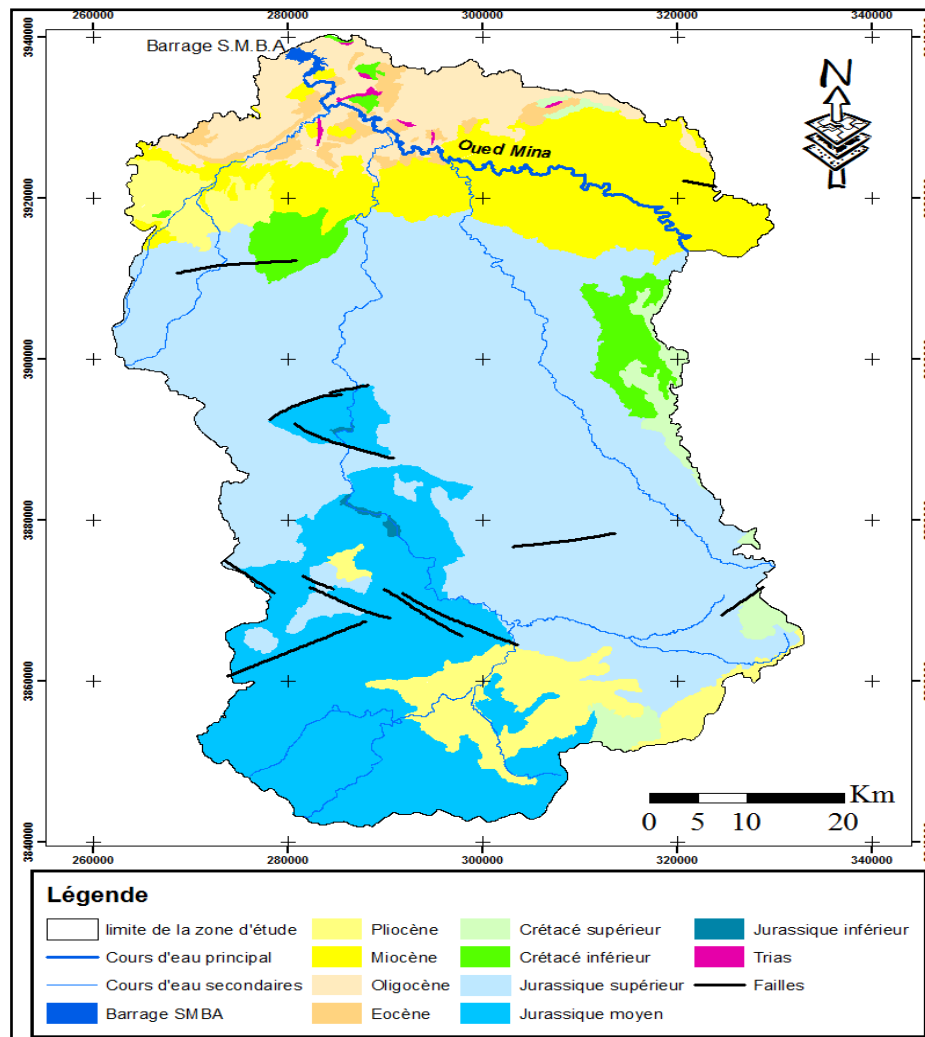
La lithologie du bassin versant étudié est résumée dans le **tableau 1**, elle est également représentée par **la figure 3**.

**Tableau 1: Lithologie du bassin versant de la Mina au droit du barrage SMBA.**

Ere	Période	Etages	Le (%)	Description	
TERTIAIRE	Néogène	Pliocène	7.4	-Sables fins rouge et jaune claire, dunes. -Des grès sableux avec en partie un peu de cimentation carbonatée, calcaires sableux et croûtes calcaires pouvant atteindre 1m d'épaisseur.	
		Miocène	12.59	-Grès brun à grains fins d'origine marine avec cimentation carbonatée. Marnes sableuses alternant en partie avec des bancs de grès peu importants. -Dépôts de carbonates et de grès en partie sous forme de conglomérats et de brèches. -Marnes avec des intercalations de minces plaques de grès et de bancs de limons.	
	Paléogène	Oligocène	6.33	-Bancs de grès et de carbonates importants, avec de rares intercalations de couches de marnes. -Des marnes vert claires avec sporadiquement de faibles bancs de grès et de limon, en partie de marnes sableuses foncées.	
		Eocène	1.65	-Calcaires fossilisés surtout d'origine marine et calcaire à Nummulites, grès mal assortis avec cimentation carbonatée -Calcaires à Foraminifères, grès marins en alternance avec des marnes colorées.	
	SECONDAIRE	Crétacé	supérieur	2.3	-Des marnes, des grès à grains fins jaune-rougeâtre, des importantes quantités de calcaires gris et dolomies.
			inférieur	3.14	-Marnes claires à verdâtres, pierres limoneuses et des calcaires en partie sableux et par endroits stromatolithe.
Jurassique		supérieur	45.92	-Calcaires et dolomies alternant en générale avec des marnes claires et par endroits avec des calcaires sableux et des marnes.	
		moyen	20.2	-Importante quantité de calcaire gris et dolomies, surfaces karstique avec éboulis.	
		inférieur	0.16	-Alternance de grès quartziques, dolomies, roches limoneuses et marnes.	
Trias			0.14	-Grès durs et dolomie	

Source (I.F.G., 1987).

**Remarque:** L'ensemble des figures utilisées, sont des images regroupant plusieurs couches issues de la digitalisation par un logiciel de SIG (**Arc gis 9.3**) des cartes (lithologiques, de réseau hydrographique, du couvert végétale et de pentes) du bassin versant de la Mina au droit du barrage Sidi Mhammed Ben Aouda. Les cartes supports ont été Réalisées par l'I.F.G., Institut des Géosciences Appliquées, (D-6050 Offenbach. République Fédérale d'Allemagne, 1987) et ce dans le cadre de la réalisation du barrage de SMB Aouda.



**Figure 3: Carte géologique du bassin versant de l'oued Mina.**

En résumé on peut dire que le sous sol du bassin versant étudié peut être divisé en :

- Calcaires et dolomies du jurassique moyen au Sud et au Sud-Ouest;
- Jurassique supérieur dans la région centrale avec toujours des calcaires et dolomies alternant en générale avec des marnes claires et par endroits avec des calcaires sableux et des marnes. La partie Est de cette même région est caractérisée par des grès et des marnes, tandis que le Nord Ouest renferme des bancs calcaires et dolomies.

- Dépôts de marnes à gypse et des grès d'origine marine à cimentation carbonatée appartenant au miocène supérieur.

### **I-2-2 Relief**

En Analysant **la figure 4**, représentant la carte des pentes de la région d'étude, on peut dire que :

- Les terrains à pentes faibles (**0 à 3 %**) sont les plus répandus dans le bassin versant, ils occupent plus de la moitié de la superficie totale (**54,55 %**). En générale, ces terrains présentent un risque d'érosion minimale, et nécessitent des mesures de protection simples.
- Les terrains à pentes allant de (**3 à 12,5 %**) sont également très répandus dans le bassin de la Mina. Localisés principalement dans la zone marneuse du Nord et dans le centre Est, ces aires occupent environ **40 %** de la superficie totale, leur vulnérabilité à l'érosion est très élevée surtout en cas d'exploitation sur de grandes parcelles sans bandes de végétation.
- Les terrains à pentes comprises entre (**12,5 et 25 %**), ils sont localisés dans la partie centrale en allant de L'Ouest jusqu'à l'extrême Est et dans le Sud Est de la zone d'étude. Ils occupent **4,68 %** de la superficie totale et présentent un risque d'érosion très élevé et nécessitent souvent des mesures de protection très importantes.
- Les Terrains à pentes supérieures à **25 %** occupent **0.07 %** de l'aire totale, localisés principalement dans le centre et le Sud-Est.

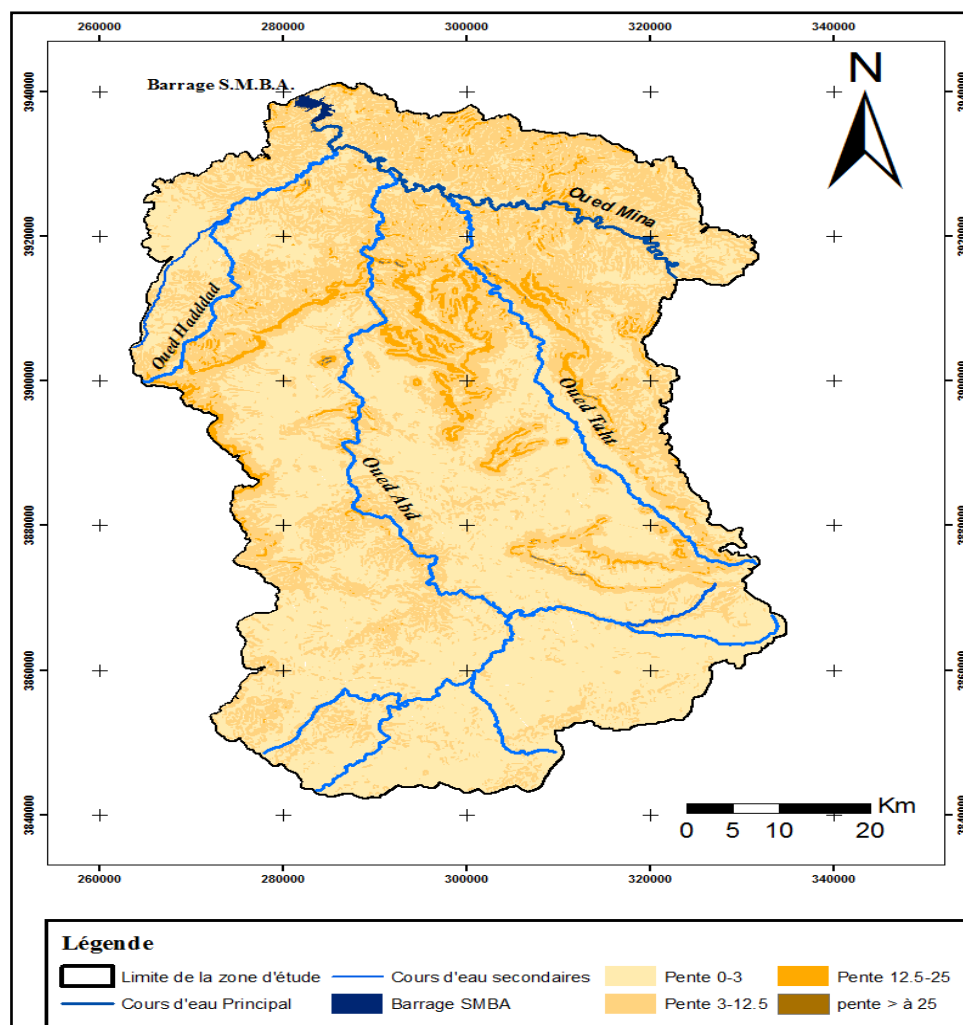


Figure 4: La carte des pentes du bassin versant de la Mina.

### I-2-3 Couvert végétal

L'analyse de la répartition géographique et de la diversité des formations végétales sur le bassin a montré deux parties nettement distinctes (Figure 5):

- **la zone nord**, purement marneuse, elle est dépourvue de végétation naturelle durable, ce qui a accéléré le phénomène d'érosion et l'extension des parcelles non utilisables pour l'agriculture. On peut toutefois rencontrer quelques îlots de reboisement et des zones irriguées occupés par des plantations d'arbres fruitiers dans les vallées.

- **La zone sud** moins érodée avec une végétation de densité très variable et très parsemée, dont environ **32,19 %** de la surface totale sont recouverts par des maquis à grande variété d'espèces (PISTACIA, TETRACLINIS, OLEA...), une forêt de Pin et une aire très restreinte destinée à la culture des céréales sont localisées dans le Sud-Est de la région, des zones irriguées situées dans les vallées des oueds, au centre de l'oued Abd et à l'Est de l'oued



Taht, le reste de la superficie est couvert par des steppes et des zones rocheuses destinées au pâturage.

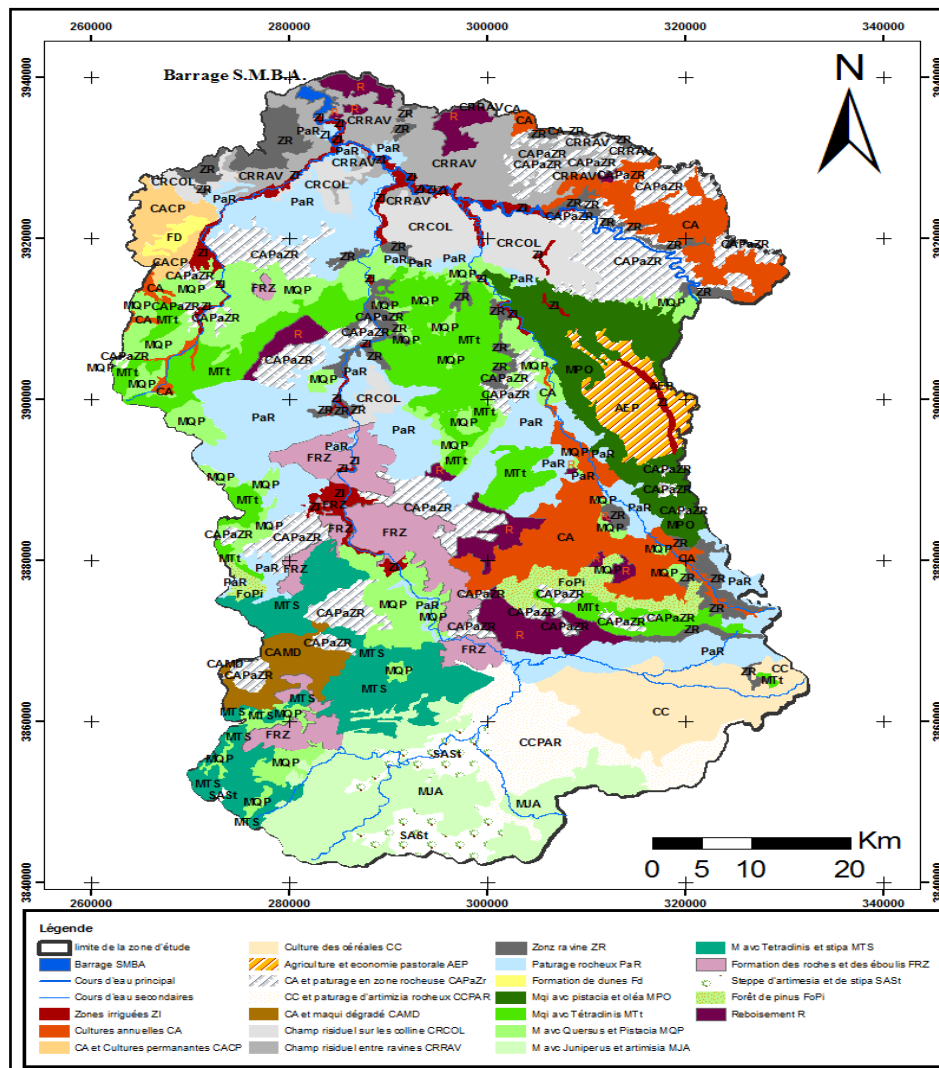


Figure 5: Carte de la couverture végétale du bassin versant de la Mina.

### I-2-4 Climatologie

Le climat de la région d'étude est de type semi-aride méditerranéen (Achite, 1999), il est rude et contrasté, avec des étés très chauds et des hivers pluvieux, mais à basses températures (Douaoui et al., 2006).

#### I-2-4-1 La pluviométrie

##### I-2-4-1-1 Les stations pluviométriques

Pour l'étude des paramètres climatiques (la pluviométrie, température, l'humidité de l'air, ...) dans le bassin versant de la Mina, et vu l'absence des stations météorologiques sur sa

quasi-totalité, on a été contraint d'utiliser les données de la station météorologique du barrage SMBA.

Les coordonnées de cette station sont mentionnées dans le **tableau 2**.

**Tableau 2: La localisation de la station météorologique retenue.**

Stations	Code station	Coordonnées		Altitudes	Période
		Longitude	Latitude	Z	
Sidi Mohammed Ben Aouda	01 34 10	312,00	254,00	150	1978 à 2010

Source (ANRH Relizane, 2012)

#### I-2-4-1-2 Les précipitations

Les précipitations représentent l'un des principaux facteurs climatiques. Elles englobent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface du globe sous forme liquide ou solide.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles et leur contribution à la pluie moyenne annuelle, de la station étudiée, sont résumées dans le **tableau 3** suivant.

**Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles et leur contribution à la pluie moyenne annuelle de la station étudiée pour la période (1978-2010).**

Mois/ Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
SMBA	18,4	31,6	<b>40,0</b>	40,4	35,2	34,7	28,4	30,5	26,1	3,0	<b>1,4</b>	5,0	295
Cont (%)	6	11	14	14	12	12	10	10	9	1	0	2	100

Source (ANRH Relizane, 2012)

La précipitation moyenne interannuelle à la station de Sidi Mhammed Ben Aouda est de **295 mm (Tableau 3)**.

La représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de cette station (**Tableau 3**) est donnée par la **figure 6**.

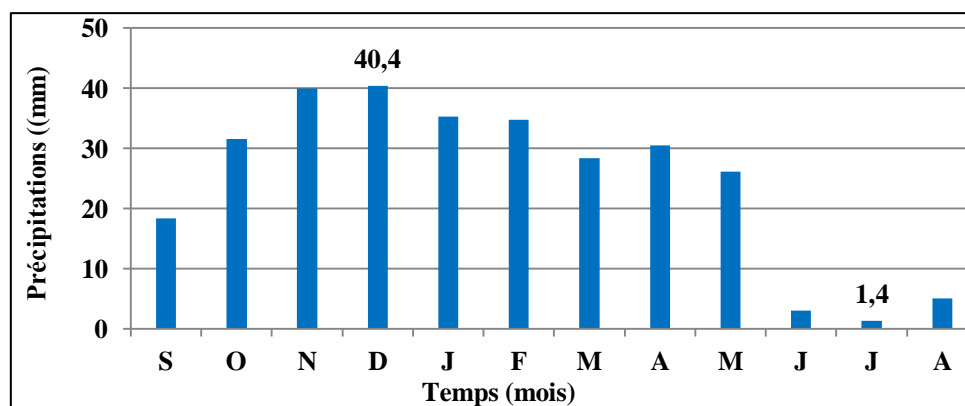


Figure 6: Précipitations moyennes mensuelles à la station étudiée (période 1978-2010).

L'examen de la figure 6, montre que les précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de cette station sont très variables d'un mois à un autre. Les premières précipitations sont enregistrées le mois de septembre tandis que la quantité la plus élevée est observée pendant le mois de décembre. Les mois de Juin, Juillet et Août reçoivent des précipitations insignifiantes.

#### I-2-4-2 Les températures

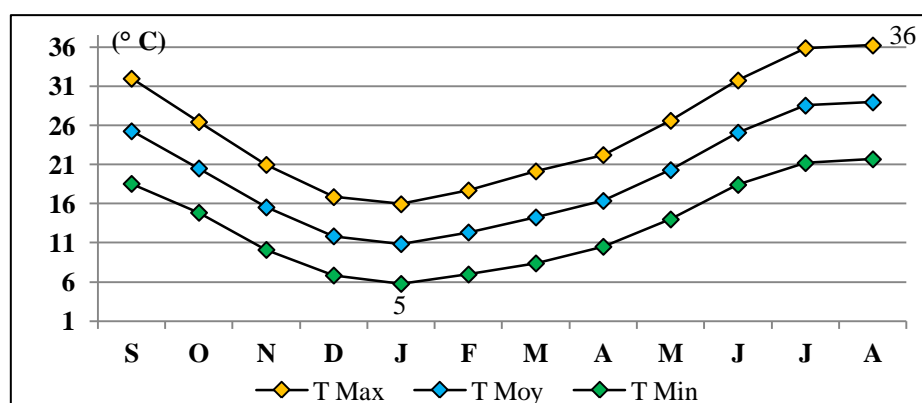
La température est le second paramètre qui conditionne la climatologie d'une région après les précipitations. Elle est soumise à des variations annuelles conditionnées par des facteurs environnementaux tels que l'altitude et l'exposition.

Les valeurs des températures moyennes mensuelles (maximales, minimales et moyennes) de la station étudiée pour la période (1978-2010), sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 4: Températures moyennes mensuelles de l'air, (maximales, minimales et moyennes) pour la station étudiée, période (1978-2010)

Station	Valeurs moyennes	S	O	N	D	j	F	M	A	M	J	J	A	Moy
SMBA	T° Max (°c)	31	26	20	16	15	17	20	22	26	31	35	36	25
	T° Moy (°c)	25	20	15	11	10	12	14	16	20	25	28	28	19
	T° Min (°C)	18	14	10	6	5	6	8	10	14	18	21	21	13

Source (ANRH Relizane 2012)



**Figure 7: Températures moyennes mensuelles de l'air (maximales, minimales et moyennes) enregistrées à la station étudiée Pour la période (1978-2010).**

Le **tableau 4** et la **figure 7** montrent que la plus faible valeur des températures minimales moyennes mensuelles à la station SMBA est de **5 °C** enregistrée au mois de janvier (mois le plus froid), quant à la plus importante, elle est de **36 °C** enregistrée au mois d'août (mois le plus chaud).

De mai à octobre, les températures moyennes mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle **19 °C** et de novembre à avril, elles sont inférieures à cette dernière; ce qui permet de diviser l'année en deux semestres: un semestre froid et un semestre chaud.

**I-2-4-3 Les vents**

Les vitesses moyennes et maximales moyennes du vent enregistrées à la station SMBA (**tableau 5**) sont respectivement de **2,5 m/s** et **10,9 m/s**

**I-2-4-4 Humidité relative**

Pour la station de SMBA, l'humidité relative moyenne mensuelle pour la période (1978-2010), fluctue entre **67%** aux mois de janvier et **34%** au mois de Juillet.

**Tableau 5: les moyennes mensuelles de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air enregistrées à la station étudiée pour la période (1978/2010).**

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy	
<b>Humidité</b>	43	54	63	66	<b>67</b>	63	58	50	45	41	<b>34</b>	37	<b>52</b>	
Vitesse du vent (m/s)	Moy	2,5	2,1	2,2	2,5	2,2	2,2	2,5	2,8	2,8	2,8	2,5	2,5	<b>2,5</b>
	Max	11,6	10,4	10,3	10,0	9,6	9,9	10,8	11,7	11,8	11,9	11,5	11,8	<b>10,9</b>

Source (ANRH Relizane, 2012)

### I-2-4-5 Le bilan hydrologique

Pour la détermination du bilan hydrologique, nous avons choisi la méthode de THORNTHWAITE compte tenu d'une part, des données disponibles (Températures et précipitations) et d'autre part, de la nature du climat qui règne dans la région. Les principaux paramètres recherchés sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (Exc.) ou infiltration efficace.

#### A. Évapotranspiration potentielle (ETP)

Après les précipitations, l'évapotranspiration est le paramètre le plus important du bilan hydrologique, elle constitue le transfert de l'eau de la terre vers l'atmosphère par évaporation des eaux de surface et du sol et par la transpiration des végétaux.

En l'absence de mesures directes de l'ETP nous l'avons estimée de façon empirique par la formule de THORNTHWAITE (**Formule 1**), qui est largement utilisée pour les climats semi-arides (**Gerard, 1999**). Cette dernière permet de calculer l'évapotranspiration potentielle à partir des données de base de température moyenne de la période considérée en (°C), La fonction complexe  $a$  de l'indice  $I$ ,  $I$  c'est l'indice thermique annuel, somme de 12 indices mensuels ( $\sum i$ ); Le facteur correctif  $F(\lambda)$  qui est fonction de la latitude du lieu considéré ; il est donné par les tables de **Brochet & Gerbier, (1968)**.

$$ETP = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^{a(I)} F(\lambda) \quad (1)$$

Avec

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (2)$$

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

$$a = 0,49 + [(1,79 * 10^{-2})I - (7,71 * 10^{-5})I^2 + (6,75 * 10^{-7})I^3] \quad (4)$$

#### B. Calcul de l'Évapotranspiration Réelle (ETR) et du bilan hydrologique

Pour l'établissement du bilan hydrologique par la méthode classique de THORNTHWAITE, on calcule d'abord pour chaque mois de l'année, sur la période considérée, l'ETP (**Tableau 6**). Le calcul de l'ETR et de l'excédent (Exc.) est effectué de la façon suivante :

- Si pour un mois ( $P \geq ETP$ ) on pose que ( $ETP=ETR$ ), la quantité d'eau qui reste ( $P-ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura

un excès (Exc) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

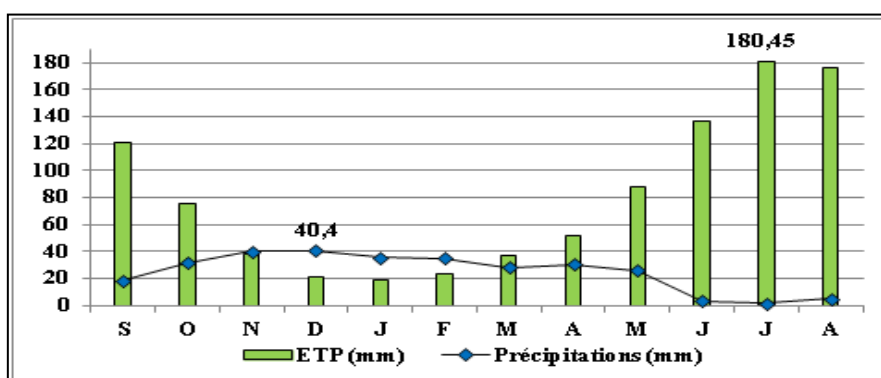
- Si ( $P < ETP$ ), la valeur de ( $ETR = P + RFU$ ), jusqu'à égalisation avec  $ETP$ . Si la  $RFU$  est nulle, il va se produire un déficit agricole ( $Da = ETP - ETR$ ), ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Selon **Remenieras (1976)**, l'un des points les plus délicats dans l'application de la méthode de THORNTHWAITE réside dans le choix de la hauteur maximale d'eau qui peut être accumulée en relation avec l'humidité du sol. Dans notre cas, la valeur de 100 mm que nous allons retenir est une recommandation de THORNTHWAITE pour les régions méditerranéennes (**Tanina et al., 2011**).

Les tableaux (6 et 7), résument les résultats de calcul de l'ETP, ETR et de l'excédent hydrique.

**Tableau 6: Evapotranspiration potentielle à la station étudiée (1978-2010).**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T (°c)	10	12	14	16	20	25	28	28	25	20	15	11
i	3,01	3,69	4,63	5,75	8,03	11,14	13,60	13,90	11,27	8,17	5,30	3,46
ETP	20,33	26,60	36,00	47,91	74,75	115,44	150,37	154,87	117,10	76,39	43,02	24,43
Indice, correctif	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
ETP corrigée	17,69	22,61	37,08	52,23	90,44	139,69	184,96	179,65	120,61	74,10	37,00	20,77



**Figure 8: Variation de l'évapotranspiration et des précipitations mensuelles à la station de SMBA pour la période (1978-2010).**

On analysant la **figure 8**, on peut constater, qu'en saison chaude, les valeurs de l'évapotranspiration sont très élevées et dépassent fortement celles des précipitations (une ETP de plus de 180 mm contre une pluviométrie qui ne dépasse guère les 5 mm). En saison froide, l'ETP décroît progressivement mais elle reste toujours importante, seuls les trois mois

de novembre, décembre, janvier et février, enregistrent des valeurs de précipitations supérieures à celles de l'évapotranspiration.

**Tableau 7: Bilan hydrologique à la station de SMBA pour la période (1978-2010).**

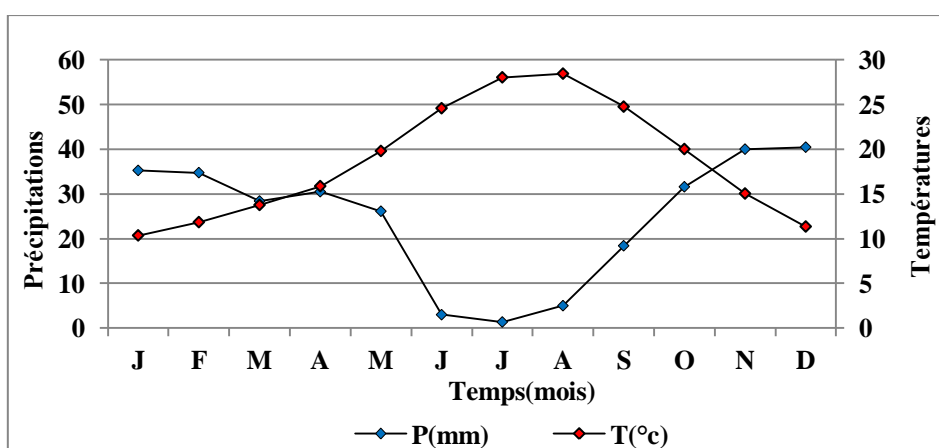
Bilan hydrologique selon la méthode de THORNTHWAITE												
mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	35,2	34,7	28,4	30,5	26,1	3,0	1,4	5,0	18,4	31,6	40,0	40,4
ETP (mm)	17,69	22,61	37,08	52,23	90,44	139,69	184,96	179,65	120,61	74,10	37,00	20,77
ETR (mm)	17,69	22,61	37,08	52,23	90,44	8,61	1,4	5	18,4	31,6	37,00	20,77
RFU	100	100	91,32	69,59	5,61	0	0	0	0	0	3	22,63
Exc	17,51	12,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Da	00	00	00	00	00	131,08	183,56	174,65	102,21	42,5	0	0

### I-2-4-6 Indices climatiques

#### I-2-4-6-1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Pour Gausсен, un mois est "sec" si le quotient des précipitations mensuelles P exprimées en mm, par la température moyenne T exprimée en °C, est inférieur à 2. La représentation sur le même graphique des températures et des précipitations moyennes mensuelles avec en abscisse, les mois permet d'obtenir les diagrammes ombrothermiques qui mettent immédiatement en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses (Gerard, 1999).

La figure 9 représente le diagramme Ombrothermique de la station SMBA pour la période (1978-2010).



**Figure 9: Diagramme ombrothermique de la station SMBA pour la période (1978/2010).**

D'après le diagramme ombrothermique de la station SMBA (**Figure 9**), on distingue une période sèche qui s'étale sur sept mois, d'avril à octobre, et le reste des mois de l'année sont considérés comme humide.

#### **I-2-4-6-2 Indice d'aridité de De Martonne**

##### **I-2-4-6-2-1 Définition de l'aridité**

L'aridité, peut être définie comme une caractéristique climatique d'une zone donnée ; c'est la situation permanente de faibles précipitations annuelles ou saisonnières et le déficit très important de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle (**Lain, 2005**). Elle ne doit pas être confondue avec la sécheresse, qui est un événement temporaire (**Beran & Rodier, 1987**).

L'aridité a de fortes implications hydrologiques et édaphiques dont elle est indissociable (**Aggoussine, 2003**). Selon **Le Hourou (1995)**, il est difficile de définir un milieu aride, une telle définition tient compte des notions diverses relevant de la climatologie, de la morphologie et de la biologie (surtout végétale).

##### **I-2-4-6-2-2 Indice d'aridité annuelle de De Martonne**

Le calcul d'un indice d'aridité, au même titre que la classification des climats, a toujours été un sujet de recherche en climatologie. Il existe une multitude d'indices et de formules, certaines basées sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques.

Parmi tous ces indices, les plus connus restent ceux d'Emmanuel De Martonne (1926 à 1941), Charles Warren Thornthwaite (1948) et Bagnouls et Gaussen (1953 à 1957).

Le facteur de pluie de Lang a été modifié par De Martonne en 1923, de manière à éviter d'avoir des valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0 °C (**De Martonne, 1926 in Gerard, 1999**). Noté I, cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région, il est calculé par la formule suivante:

$$I = P/T + 10 \quad (5)$$

Où;

**P**: La hauteur moyenne des précipitations annuelles et **T**: La moyenne des températures annuelles.



Il a des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et des valeurs d'autant Plus faible que le climat est plus sec. De Martonne a ainsi proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice qui sont donnés dans **le tableau 8**.

**Tableau 8: Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne.**

Valeur de l'indice	Type de climat
0<I<5	hyperaride
5<I<10	aride
10<I<20	Semi-aride
20<I<30	Semi-humide
30<I<55	humide

Source (**Gerard, 1999**)

**Le tableau 9**, donne la valeur de I calculée par **la formule 5** pour la station étudiée.

**Tableau 9: L'indice de DE MARTONNE annuel pour la station étudiée**

Station	Précipitation annuelle	Température moyenne	I
SMBA	294,76	18,65	<b>10,29</b>

Comme le montre le tableau 9, la valeur de I calculée pour la station est comprise entre 10 et 20, ce qui caractérise un climat **semi Aride** et cela en se référant à la classification donnée par De Martonne (**Tableau 8**).

#### **I-2-4-6-2-3 Indice d'aridité mensuelle de De Martonne**

En plus de l'indice d'aridité annuelle, De Martonne a également proposé une variante de l'indice d'aridité pour caractériser le climat à l'échelle mensuelle. Dans ce cas, les précipitations prises en compte sont celles de mois considéré, multipliées par 12 (**Formule 6**), afin d'aboutir à une valeur d'indice comparable à celle de l'indice annuel.

$$i = \frac{12p}{(t + 10)} \quad (6)$$

Avec **p** et **t** : sont respectivement la précipitation et la température du mois considérée et **i** : l'indice d'aridité mensuelle.

Pour préciser les conditions de l'aridité de chaque mois dans notre zone d'étude, on utilise l'indice d'aridité mensuelle de De Martonne, calculé à l'aide de **la formule 6**, les valeurs trouvées sont consignées dans **le tableau 10**.

**Tableau 10: Indice d'aridité mensuelle de De Martonne pour la station étudiée.**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	12,1	22,0	<b>29,5</b>	25,3	25,1	27,7	33,7	20,5	17,2	3,4	2,2	3,1
t moy (°c)	25	20	15	11	10	12	14	16	20	25	28	28
i	6,35	12,63	19,17	22,73	20,78	19,09	14,34	14,14	10,52	1,03	0,43	1,56

Selon les valeurs de *i* (**Tableau 10**), et la classification de De Martonne donnée dans le **tableau 8**, on peut classer les mois de l'année comme suite:

- Les mois de juin, juillet et août sont considérés comme hyperarides tandis que le mois de septembre est classé arides.
- Durant les mois de février, mars, avril, mai, octobre et novembre le régime semi-humide occupe la région.
- Les mois de décembre et janvier sont considérés comme semi-humide.

### I-3 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques

#### I-3-1 Caractéristiques Physiques du bassin versant de la Mina

Le bassin versant ou bassin du drainage, est un ensemble topographique, dont la surface est délimitée par les lignes de crêtes et drainée par un réseau hydrographique. Il a une fonction de collecteur des eaux de ruissellement des pluies et des rejets des centres urbains, industriels et agricoles qui produisent un écoulement à son exutoire.

##### I-3-1-1 Caractéristiques géométriques

- **Périmètre:** Il est défini par la ligne de crête formant le contour général du bassin versant. Il est exprimé en kilomètre.
- **Superficie:** C'est l'aire géographique délimité par les crêtes topographiques qui se rejoignent à l'exutoire.

##### I-3-1-2 Caractéristiques morphologiques

###### I-3-1-2-1 Paramètres de forme

- **Indice de compacité de GRAVELIUS (Kc):** La forme du bassin versant exerce une influence sur la concentration des débits résultants d'une pluie donnée. L'indice admis pour représenter cette caractéristique est le coefficient de compacité de GRAVELIUS. Il est établi

en comparant le périmètre d'un bassin versant donné à celui d'un cercle de même superficie. Il est donné par la formule suivante:

$$K_c = 0,28 P / \sqrt{S} \quad (7)$$

Avec: **P** : Périmètre du bassin versant; **S**: Superficie du bassin versant;

- **Rectangle équivalent:** La notion du rectangle équivalent a été introduite pour faciliter la comparaison des bassins versants entre eux, du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Les formules pour calculer la longueur L et la largeur l sont :

$$L = K_c \frac{\sqrt{S}}{1,128} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right) \quad (8)$$

$$l = K_c \frac{\sqrt{S}}{1,128} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right) \quad (9)$$

- **Répartition et courbe hypsométrique**

Elle est d'une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Selon la répartition hypsométrique de notre bassin versant (**Achite, 2007**), la bordure sud du bassin versant de la Mina au droit du barrage SMBA, qui passe à 20 Km seulement de Chott-Ech-Chergui, est constituée de relief dépassant 1000 m d'altitude (côte maximale de **1339m**), représentant environ **20 %** de sa superficie totale. Une part importante du bassin est située entre **400** et **1000 m**, la zone inférieure à **400 m**, ne présente que **9 %** de la superficie totale. Les surfaces partielles par tranche d'altitude du bassin versant étudié sont données dans le **tableau 11** suivant.

Tableau 11: Répartition hypsométrique du bassin versant de la Mina.

Bassin versant	Altitudes(m)	Superficies Partielles		Superficies cumulées		Altitudes moyennes (m)
		(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)	
Oued Mina Au droit du barrage SMBA	1339-1200	30	0,61	30	0,61	1269,50
	1200-1000	960	19,60	990	20,21	1100
	1000-800	1318	26,90	2308	47,11	900
	800-600	1070	21,84	3378	68,95	700
	600-400	1082	22,08	4460	91,03	500
	400-200	405	8,26	4865	99,29	300
	200-145	35	0,71	4900	100	172,25
<b>Total</b>		4900				

Source (Achite, 2007).

L'altitude médiane (H 50%) est déterminée sur la courbe hypsométrique, et l'altitude moyenne est calculée par la formule suivante:

$$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i H_i}{S} \quad (10)$$

Avec

$$H_i = (H_{n-1} + H_n) / 2 \quad (11)$$

$H_i$ : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives (n-1) et (n) en (m);

$S_i$ : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau consécutives (n-1) et (n) en (m);

$S$ : Surface totale du bassin versant en Km<sup>2</sup>.

- **Indice de pente globale "I<sub>g</sub>"** : il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule suivante:

$$I_g = (H_{5\%} - H_{95\%}) / L \quad (12)$$

- **Densité de drainage** : elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs  $L_i$  du bassin versant, à la surface totale S.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad \text{exprémée en Km/Km}^2 \quad (13)$$

- **Temps de concentration**

C'est le temps que mis la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Ce temps se calcul par la formule suivante.

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + (1,5L_{cp})}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (14)$$

Où

**S**: Surface du bassin versant en Km<sup>2</sup>;

**L<sub>cp</sub>**: Longueur de cours d'eau principal en Km;

**T<sub>c</sub>**: Temps de concentration en Heure;

**H<sub>moy</sub>**: Altitude moyenne en m;

**H<sub>min</sub>**: Altitude minimale en m.

L'ensemble des caractéristiques de notre bassin versant sont récapitulées dans le **tableau 12** suivant:

**Tableau 12: Caractéristiques physiographiques du bassin versant étudié.**

		Paramètres	Bassin au droit du barrage de S.M.B.A
Caractéristiques de forme	<b>S</b>	Km <sup>2</sup>	4900
	<b>P</b>	Km	315
	<b>Kc</b>	-	1,26
	<b>L</b>	Km	114,83
	<b>l</b>	Km	42,67
Caractéristiques topographiques	<b>H<sub>max</sub></b>	m	1339
	<b>H<sub>min</sub></b>	m	145
	<b>H<sub>moy</sub></b>	m	755
	<b>H<sub>5%</sub></b>	m	1232
	<b>H<sub>95%</sub></b>	m	404
	<b>H<sub>50%</sub></b>	m	874
	<b>D</b>	m	1194
	<b>D<sub>s</sub></b>	m	728
	<b>I<sub>g</sub></b>	%	24,63
Caractéristiques hydrographiques	<b>D<sub>d</sub></b>	Km/ Km <sup>2</sup>	4,48
	<b>L<sub>cp</sub></b>	Km	135
	<b>T<sub>c</sub></b>	Heures	24,41

Source (Achite, 2007).

### I-3-2 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique, appelé aussi réseau de drainage, est constitué d'un cours d'eau principal et d'une multitude de cours d'eau, appelés affluents qui peuvent être

temporaires ou permanents suivant l'importance des eaux superficielles et souterraines. Il renseigne sur le mode de drainage du bassin versant et son aptitude au ruissellement.

L'oued Mina, principal et dernier affluent rive gauche du Cheliff, coule sensiblement du sud vers le nord en drainant la cuvette comprise entre les monts de Saida à l'Ouest et le massif de l'Ouarsenis à l'Est.

Avant de déboucher dans la plaine à 20 Kilomètres au sud de Relizane, l'oued Mina traverse les derniers reliefs des monts de la Mina, qui constituent un verrou assez large à l'aval d'une cuvette importante. C'est là qu'a pu être édifié le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda.

Les trois principaux affluents de l'oued Mina entre les deux barrages Bakhada et SMB Aouda sont:

- **Oued Haddad** : Affluent de la rive gauche de l'oued Mina, contrôlé par la station Hydrométrique de Sidi A.E.K. Djillali. L'oued Haddad draine un bassin versant de 470 Km<sup>2</sup>, il prend sa source dans le djebel Bazita (côte 1 000-1 100 m) et collecte les eaux des oueds Baloul, Rekada et Medjaref (**Achite, 2004**).
- **Oued Abd**: contrôlé par la station Hydrométrique de Ai Hamara, il est l'affluent le plus important de l'oued Mina avec un bassin versant d'une superficie de 2480 Km<sup>2</sup> (**Touaibia, 2005**).
- **Oued Taht**: Il est contrôlé par la station hydrométrique de Kaf Mahboula, il présente une superficie de 680 Km<sup>2</sup>.

#### **I-4 Barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda**

Le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, dit barrage Es Saada, est l'un des principaux ouvrages hydrauliques réalisés ces dernières décennies sur le bassin versant de Cheliff (**ANRH Oran, 2004**). Il est construit à l'aval des stations hydrométriques de l'oued El Abtal sur l'oued Mina et Sidi Abd Elkader Djilali sur l'oued Haddad (**Figure 10**), à une vingtaine de Kilomètres au sud de la ville de Relizane et en amont de la ville de Sidi Mohamed Benaouda.

Le bassin versant au barrage SMBA est de 6100 Km<sup>2</sup>. Les apports correspondant à un cinquième environ de ce bassin versant (1200 km<sup>2</sup>) sont régularisés par le barrage de Bakhada, situé sur le cours supérieur de l'oued Mina à proximité de Tiaret. De ce fait, le barrage Es Saada contrôle une superficie de 4900 Km<sup>2</sup>. Il est constitué d'une digue homogène en terre, à drain central, d'une hauteur de **63,5 m** et d'une largeur de **860 m** (**Touaibia, 2005**).

L'ouvrage est mis en service en 1978, il est doté d'une capacité initiale de 235 Hm<sup>3</sup>, il la atteint en mars 1996 après plus 17 ans de sa mise en service. L'eau du barrage est destinée à l'alimentation en eau potable de la ville de Relizane et Sidi Mohamed Benaouda ainsi que pour l'irrigation de la plaine de la Mina (ABH-CZ, 2012).

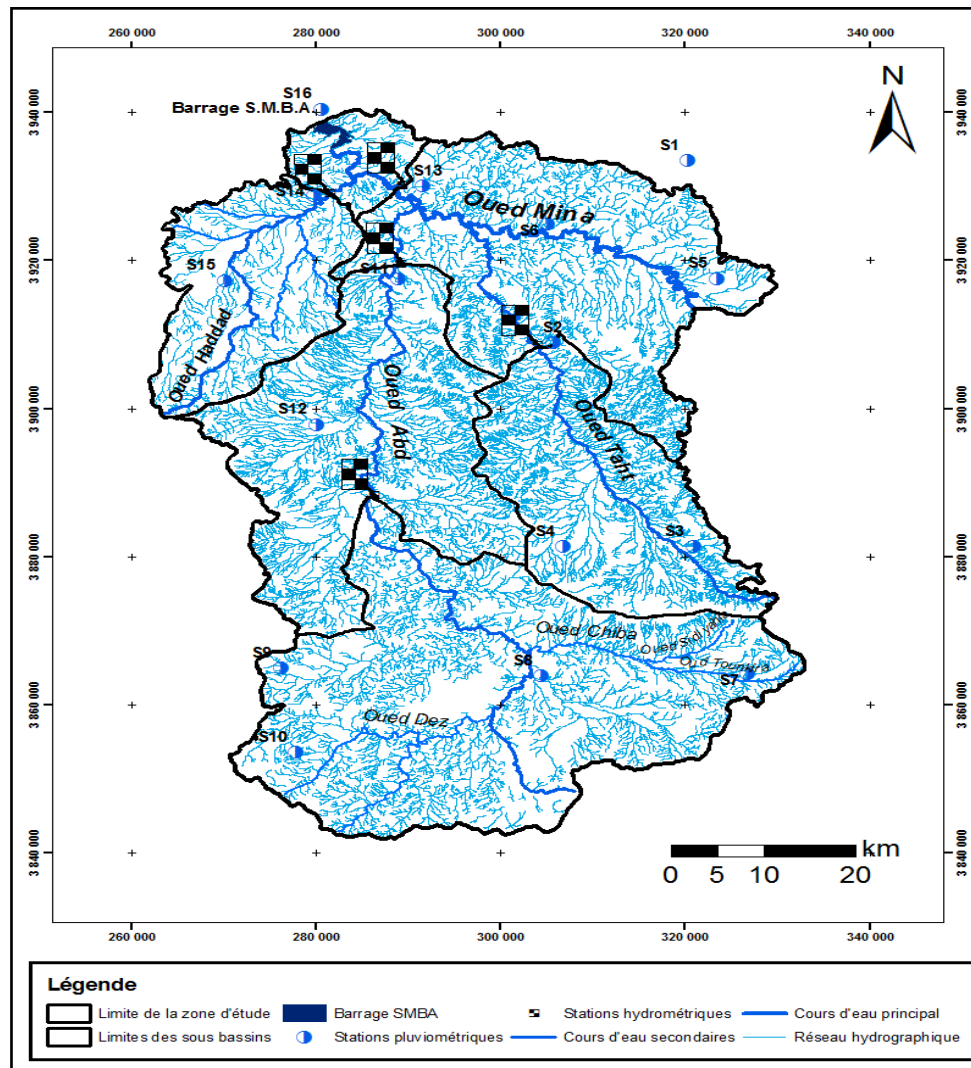


Figure 10: Le réseau hydrographique de l'oued Mina et limites des sous bassins versants.

### I-5 Source de pollution dans la zone d'étude

#### ✓ Pollution d'origine domestique

Le bassin versant de la Mina au droit du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda compte en principe 25 agglomérations dont le nombre de population est compris entre 1000 et 43 000 habitants (ABH-CZ, 2004).

Le tableau suivant présente l'ensemble des agglomérations et leur implantation par sous bassin versant.

**Tableau 13: Les agglomérations et leurs points de rejet d'eaux domestiques.**

Code de sous bassin versant	Agglomérations	N <sup>bre</sup> d'habitants En 1998	Lieu de rejet	Taux de Racc à un réseau d'ass en (%)
0130	Ain Elhadid	9 824	O. Taht	100
	Ben Amara	1 156	-	-
	Abid	987	-	-
	Frenda	43 505	O Taht	99
0131	Ain Ferah	3 263	O. Taht	95
	Ain Bouras	1 276	O. Mina	95
	Djilali Ben Amar	3 513	O. Mina	-
	Karrouba	1 485	O Mina	0%
	Brrage Bakhada	1 270		
	Mechraa Sfa	8 337	O Mina	98
	Sidi Bakhti	3 401	O Sidi Bkhti	95
	Sidi Allel	1 295	-	85
Ain Beida	942	-	85	
0132	Djebilet Rosfa	3 141	Oued	98
	Ain Karmes	12 416	O. Tounkira	98
	Tircine	1 703	-	-
0133	Takhemart	18 362	O. Abd	-
	Bounoual	2 964	-	-
	Melaab	2 798	-	95
	Guercha Bouazid	1 149	-	80
	Oued El-Abtal	13 412	Oued Abd	100
	Ouled Bali	1 757	Oued Abd	100
0134	Zlamta	4 384	Oued Haddad	100
	El-Hachem	11 837	Oued Haddad	95
	Ain Mansour	2 669	Oued Medjeref	95

Source (ABH-CZ, 2004).

En analysant le **tableau 13**, on constate que la majeure partie des agglomérations sont raccordées à un réseau d'assainissement mais selon l'**ABH Chlef (2012)**, il n'ya que le réseau d'assainissement du Chef-lieu de commune d'El-Hachem qui est raccordé à une station du lagunage, qui déverse une partie de l'eau épurée dans un bassin pour l'irrigation et une autre partie est rejetée dans l'oued Haddad.



✓ **Pollution d'origine industrielle**

La seule activité industrielle existante dans le bassin versant de la mina se résume à une fabrique de chausseurs implantée dans la commune de Frenda (ABH-CZ, 2004)

✓ **Pollution d'origine agricole**

Selon Touaibia (2005), plus de la moitié de la population de la zone d'étude pratique une agriculture d'autosubsistance ce qui a induit une surexploitation des sols, et un surpâturage de la végétation existante. Les superficies agricoles conduites en irrigué sont situées principalement dans les vallées de l'oued Mina et ses affluents et elles occupent moins de 3% de la superficie totale.

De ce fait, on peut avancer que le problème majeur causé par l'activité agricole dans le bassin versant étudié, réside dans l'érosion des sols par surexploitation et surpâturage.

**Conclusion**

En résumé, au niveau du bassin versant de la Mina, situé dans une région Semi aride, caractérisée par une période sèche très longue et des précipitations souvent aléatoires, la construction du barrage SMBA a été une importante initiative pour la mobilisation des eaux de surface dans la région. Mais malheureusement, en plus de l'envasement précoce de part sa position par rapport à la zone des marnes et la difficulté des contraintes climatiques qui accélère le phénomène, l'ouvrage est menacé d'une pollution par les eaux usées domestiques en provenance des populations riveraines qui rejettent leurs effluents dans le cours de l'oued Mina et ses affluents sans aucun traitement.

Vu que les précipitations sont la principale source d'eau qu'on vise de mobiliser, l'étude des fluctuations du régime pluviométrique dans la région semble être d'une importance primordiale.

## Introduction

Dans les zones semi-arides, les précipitations sont souvent très irrégulières et intenses. Afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles dans la zone d'étude, les cumuls annuels sont soumis en premier lieu à une analyse en composantes principales dans le but de mettre en évidence la distribution temporelle des précipitations sur la période étudiée et donner une meilleure répartition spatiale des stations prises en compte, en suite, les cumuls sont soumis à une série de tests statistiques visant la détection d'éventuels changements dans le régime pluviométrique.

## II-1 Collecte et mise en forme des données

### II-1-1 Réseau pluviométrique et données utilisées

Sur l'ensemble de sa superficie, le bassin versant de la mina au droit du barrage SMBA, est parsemé de 21 stations pluviométriques; malheureusement, seules 16 d'entre elles présentent une période de mesure longue et commune soit de 1970/1971 à 2009/2010, mais en présentant souvent des lacunes qui convient de combler.

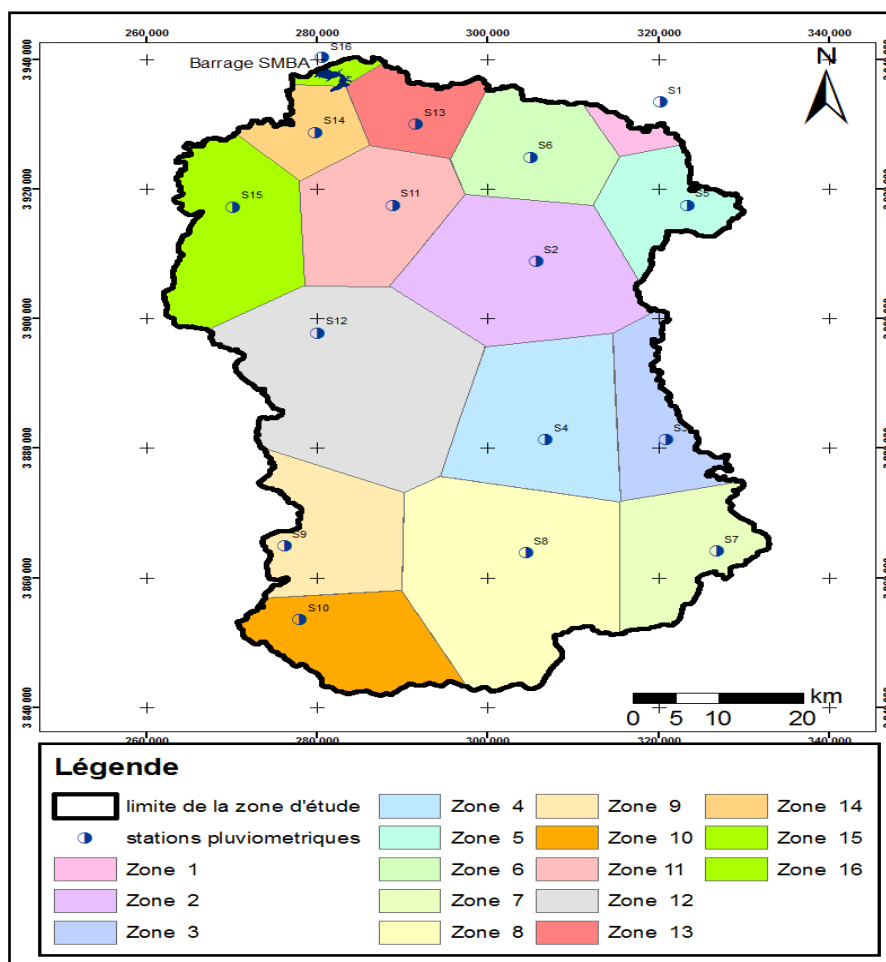
Les données pluviométriques utilisées pour cette étude, proviennent des services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques à Alger (A.N.R.H. de Bir Mourad Rais).

Le **tableau 14** donne les coordonnées Lambert, l'altitude, et la surface d'influence de chaque station pluviométrique, et **la figure 11** illustre leur implantation.

**Tableau 14: Les stations pluviométriques retenues et leurs caractéristiques.**

N°	Stations	Code	X(Km)	Y (Km)	Z (m)	Surface d'influence
1	Rahuia	012702	347.85	249.15	650	70
2	Kef-Mehboula	013001	331.60	224.25	475	540
3	Frenda	013002	348.60	197.00	990	203
4	Ain El Haddid	013004	334.50	197.00	829	573
5	Mechra safa	013101	351.00	233.20	655	220
6	Djilali Benamar	013102	332.50	239.90	300	258
7	Ain Kermes	013201	354.55	179.85	1162	113
8	Rosfa	013202	330.60	179.50	960	757
9	Tiricine	013203	303.90	180.50	1070	320
10	Sidi Youcef	013204	305.60	169.10	1100	302
11	Ain Hamara	013302	316.45	233.12	288	117
12	Takmaret	013304	316.40	203.10	655	580
13	Oued El Abtal	013306	318.05	261.70	354	185
14	Sidi A.E.K Djilali	013401	309.00	244.50	225	152
15	El Hachem	013407	299.50	233.10	417	475
16	Sidi M'Hamed Ben Aouda	013410	308.85	255.18	145	35

Source (Touaibia, 2005)



Source (Touaibia, 2005)

Figure 11: Situation des stations pluviométriques et leurs zones d'influences.

### II-1-2 Comblement des lacunes

Comme il est mentionné précédemment, 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 à 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.

## II-2 Analyse du régime pluviométrique

### II-2-1 Analyse de la variabilité mensuelle des précipitations et étude du régime saisonnier

Pour l'étude de la variabilité mensuelle des précipitations, on va utiliser les données mensuelles de la station de Sidi m'hamed Ben Aouda (**S16**). La raison pour laquelle on a opté pour cette station est bien, son emplacement vis-à-vis du barrage SMBA (**Figure 11**).

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons. Pour la détermination du régime saisonnier dominant dans la région d'étude, on calcule le cumul des précipitations mensuelles de chaque saison, ensuite on procède à un classement de ces quatre saisons par ordre décroissant de la pluviosité. Les quatre initiales des saisons ainsi classées forment ce que l'on appelle "**Indicatif saisonnier**" et le régime qui présente le pourcentage le plus élevé est considéré comme dominant de la région.

#### II-2-1-1 Précipitations mensuelles

En analysant le **tableau 15** et la **figure 12**, représentant la répartition mensuelle des précipitations pour la station de Sidi M'hamed Ben Aouda (**S16**), on constate que les premières précipitations sont survenues pendant le mois de septembre, et une augmentation progressive est observée pendant les mois suivants, jusqu'à atteindre le maximum pendant le mois de mars. Les mois de juin, juillet et août ont une très faible pluviométrie mensuelle.

**Tableau 15: Précipitations moyennes mensuelles de la station S16 pour la période 1970/2010.**

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Ann.
<b>S16</b>	12,5	25,0	<b>29,3</b>	<b>27,8</b>	<b>28,6</b>	<b>29,7</b>	<b>38,6</b>	24,1	20,4	5,0	2,3	3,7	246,8

Source (ANRH Alger, 2011).

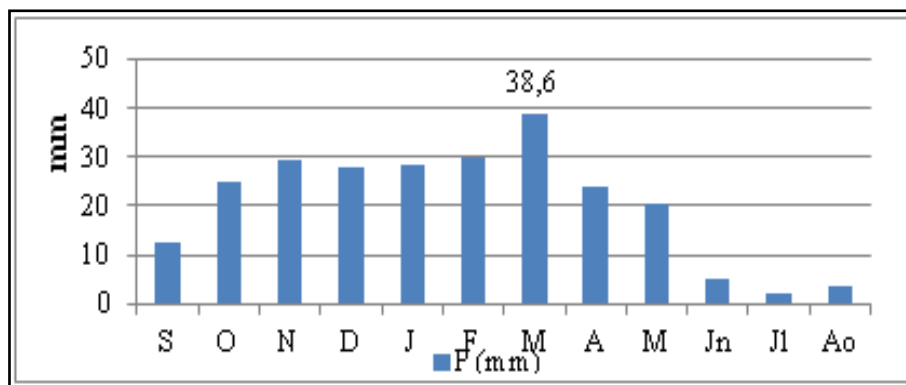


Figure 12: Variation des précipitations moyennes mensuelles, période (1970-2010) à la station S16.

II-2-1-2 Régime pluviométrique saisonnier

En analysant la **figure 13** et le **tableau 16**, il apparaît que les saisons pluvieuses se situent en hiver et au printemps dans la région. En revanche, l'été est hyperaride étant donné la rareté des précipitations pendant ces trois mois de l'année.

Tableau 16: Précipitations moyennes saisonnières à la station S16.

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P (mm)	66,76	<b>86,06</b>	83,03	10,92

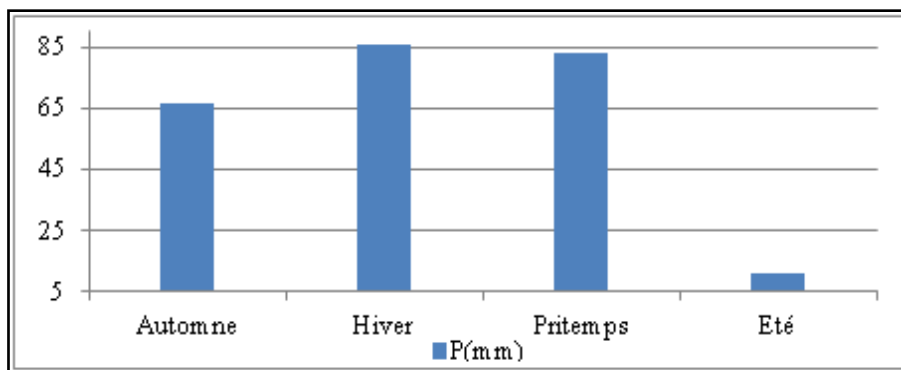


Figure 13: Précipitations moyennes saisonnières pour la période (1970/2010).

Après avoir spécifié le régime pluviométrique qui règne dans la région, pour chaque année sur la période étudiée (**Tableau I, à l'annexe**), on peut dire que le régime saisonnier le plus dominant dans le bassin versant étudié est de type **HPAE** avec un pourcentage de **30 %** (**Tableau 17**).

**Tableau 17: Pourcentage des régimes saisonniers à la station retenue.**

Stations	AHPE	APEH	APHE	HAPE	HPAE	HAEP	PAHE	PHAE
<b>S16</b>	17,5	2,5	2,5	10	<b>30</b>	2,5	12,5	22,5

## II-2-2 Analyse du régime annuel

### II-2-2-1 Variabilité relative des pluies annuelles

Le Nord Ouest Algérien est soumis à des variations pluviométriques spatio-temporelles très irrégulières (**Meddi, 2007**), pour caractériser cette variabilité interannuelle dans le bassin versant étudié, nous avons défini les différentes caractéristiques descriptives des stations pluviométriques étudiées pour la période d'observations comprise entre 1970/1971 et 2009/2010.

Pour évaluer la variabilité des précipitations annuelles dans la région, nous avons employé des formules climatiques simples mais capables de donner de bonnes informations, permettant aussi une représentation efficace du phénomène. A ce propos nous avons utilisé le coefficient de variation exprimé en pourcentage (%) et calculé comme suite:

$$CV (\%) = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (15)$$

Avec :  $\bar{x}$ : Moyenne de la série ;  $\sigma$ : Écart-type.

L'analyse **du tableau 18**, qui donne les caractéristiques de la pluviométrie annuelle des postes retenus, montre que la moyenne interannuelle pour la période d'observation est maximale dans la station de Frenda (**S3**) (**396 mm**) suivie d'une moyenne très proche à la station de Mechra Safa (**S5**) (**388 mm**). Le minimum pour la même période est enregistré à la station de Rosfa (**S8**) (**218 mm**) située un peu plus au sud des deux stations précédentes.

Les paramètres statistiques des précipitations annuelles, sont mentionnés dans **le tableau 18** suivant.

**Tableau 18: Les paramètres statistiques des précipitations annuelles, période (1970/2010) des stations étudiées.**

Les stations	Moyennes	Ecart-type	Minimum	Maximum	cv (%)
<b>S1</b>	349	88	210	525	25
<b>S2</b>	345	106	143	672	31
<b>S3</b>	396	111	221	673	28
<b>S4</b>	313	102	195	610	32
<b>S5</b>	388	137	198	835	35
<b>S6</b>	345	119	159	645	35
<b>S7</b>	324	107	156	580	33
<b>S8</b>	218	112	78	557	51
<b>S9</b>	301	104	115	562	35
<b>S10</b>	293	97	159	631	33
<b>S11</b>	265	74	165	506	28
<b>S12</b>	249	71	121	413	28
<b>S13</b>	279	84	130	558	30
<b>S14</b>	254	71	136	474	28
<b>S15</b>	291	78	153	517	27
<b>S16</b>	246,8	62	141	437	26

Après avoir calculé l'écart type ( $\sigma$ ) et le coefficient de variation (**CV %**) des pluies annuelles pour chaque station (**Tableau 18**), il ressort que pour l'ensemble des stations retenues, le coefficient de variation annuel varie entre **25 et 51 %**. Les valeurs les plus faibles sont observées dans les stations (**S1 et S11**) situées au nord et (**S3 et S12**) sises au centre du bassin, et les valeurs les plus élevées sont observées dans le Sud du Bassin, en particulier dans la station de Rosfa avec **51%**. Cette étude statistique montre que le coefficient de variation des pluies annuelles croît généralement du nord au sud de la zone étudiée.

La variabilité interannuelle est analysée par les courbes de tendances de la régression linéaire. Les graphes de **la figure 14** montrent une variation interannuelle très élevée et une tendance à la baisse illustrée par les pentes négatives des courbes de tendance.

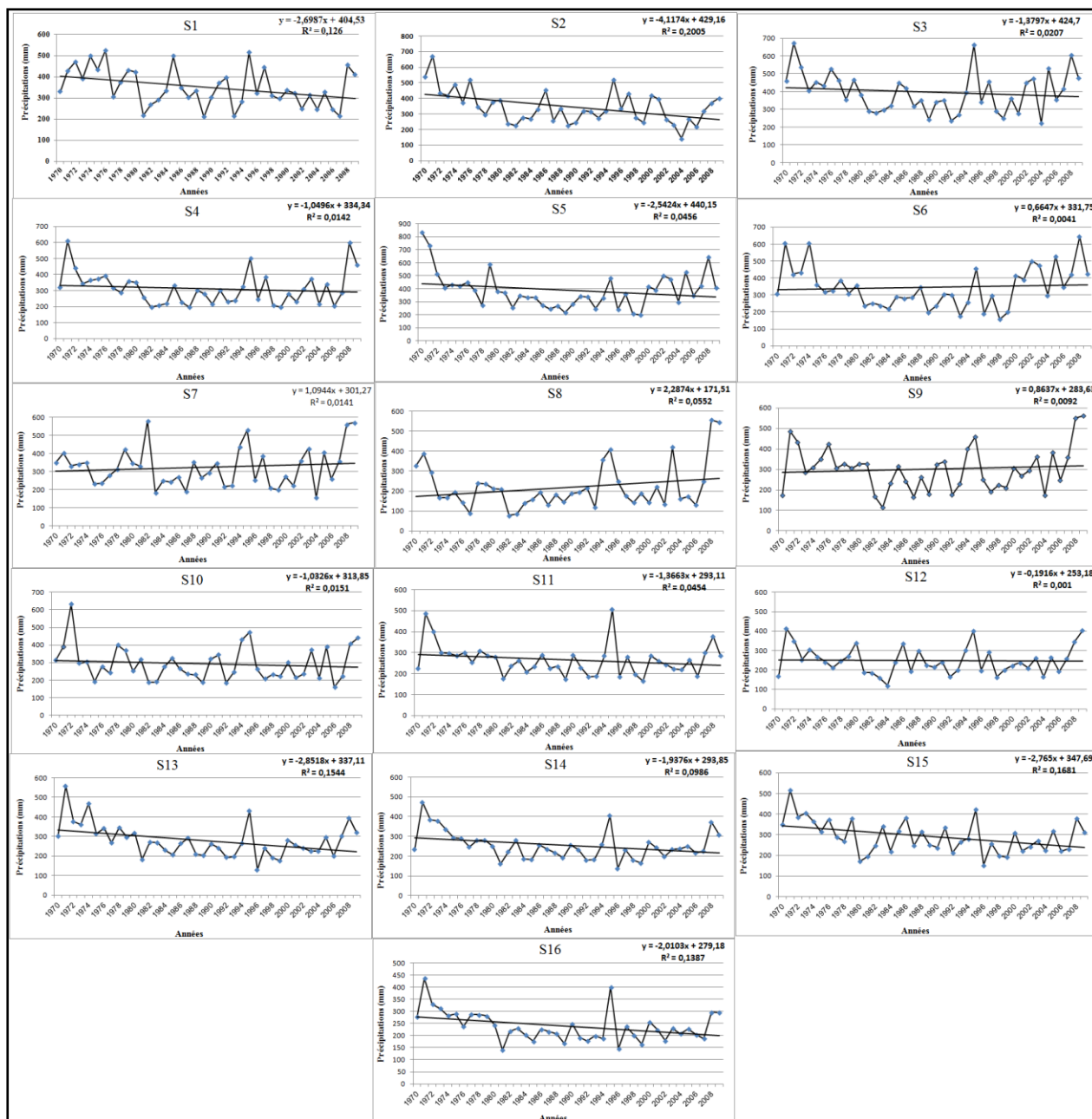


Figure 14 : La variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de l'oued Mina.

II-2-2-2 Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée sur l'ensemble du bassin versant.

Il s'agit de calculer pour l'ensemble du bassin la précipitation moyenne, pour ce faire on a utilisé la méthode de Thiessen qui consiste en un découpage géométrique du bassin versant en polygone. Elle est fondée sur l'hypothèse que chaque pluviomètre représente une zone d'influence, délimitée par le tracé des médiatrices entre deux stations consécutives (Figure 11).



La précipitation moyenne interannuelle précipitée sur le bassin versant est donnée par la formule suivante:

$$L_p = \sum \frac{P_i S_i}{S_t} \quad (16)$$

Avec:

$L_p$ : lame moyenne précipitée (mm);  $P_i$  : précipitation moyenne annuelle (mm);

$S_i$ : surface du polygone considéré (Km<sup>2</sup>);  $S_t$ : Surface totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

Les résultats obtenus sont reportés dans le **tableau 19**. La lame moyenne précipitée sur le bassin est de **294,59** mm (caractérise un régime semi-aride méditerranéen).

**Tableau 19: Détermination de la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin versant de la Mina**

Les stations	Pi (mm)	Si (Km <sup>2</sup> )	(Pi*Si)/St
<b>S1</b>	349	70	4,99
<b>S2</b>	345	540	38,02
<b>S3</b>	396	203	16,41
<b>S4</b>	313	573	36,60
<b>S5</b>	388	220	17,42
<b>S6</b>	345	258	18,17
<b>S7</b>	324	113	7,47
<b>S8</b>	218	757	33,68
<b>S9</b>	301	320	19,66
<b>S10</b>	293	302	18,06
<b>S11</b>	265	117	6,33
<b>S12</b>	249	580	29,47
<b>S13</b>	279	185	10,53
<b>S14</b>	254	152	7,88
<b>S15</b>	291	475	28,21
<b>S16</b>	238	35	1,70
<b>Total</b>	4848	4900	<b>294,59</b>

### II-2-2-3 Analyse en composantes principales des cumuls annuels

En vue d'étudier la régionalisation des précipitations dans le bassin versant de la Mina, une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux totaux annuels calculés pour la période (1970/1971-2009/2010) pour les seize stations considérées.

L'ACP, est un procédé statistique essentiellement descriptif, son objectif est de présenter, d'une manière graphique, le maximum d'informations contenu dans un tableau de données. De ce fait, cette méthode est conçue pour convertir les variables d'origines en de nouvelles variables, non corrélées entre elles, appelées composantes principales. Ces

dernières sont des combinaisons linéaires entre les variables de départ; Une fois les axes principaux sont définis, l'ACP procède à une projection de ces variables dans le nouveau espace à faibles dimensions formé par les facteurs orthogonaux (composantes principales) (Bishop, 1995).

Le fichier de données est formé d'un tableau à P=16 colonnes représentant les stations et N=40 lignes représentant les observations. La colonne P contient les 40 cumuls annuels pour une station donnée; le fichier est donc formé d'une matrice à 640 valeurs. L'analyse de ces données conduit à diagonaliser la matrice des corrélations, dont le bloc sous-diagonal est donné par le **tableau II à l'annexe**.

**II-2-2-3-1 Résultats de l'A.C.P.**

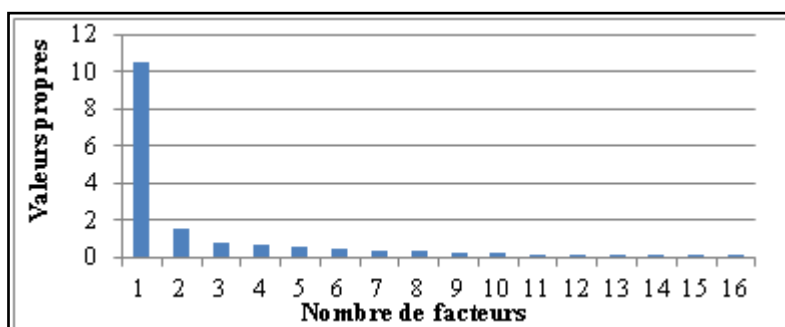
Le premier résultat interprétable est constitué par la liste des valeurs propres et des pourcentages de variance (ou pourcentages par rapport à leur somme). Les résultats sont donnés dans le **tableau 20**.

**Tableau 20: Valeurs propres, pourcentages de variance et pourcentages cumulés.**

N°	Valeurs propres	Pourcentages de variance	Pourcentages cumulés
<b>CP1</b>	10,4671	<b>65,42</b>	65,42
<b>CP2</b>	1,5387	9,62	<b>75,04</b>
<b>CP 3</b>	0,8104	5,06	80,10
<b>CP 4</b>	0,6793	4,25	84,35
<b>CP 5</b>	0,5326	3,33	87,68
<b>CP 6</b>	0,4508	2,82	90,49
<b>CP 7</b>	0,3675	2,30	92,79
<b>CP 8</b>	0,2897	1,81	94,60
<b>CP 9</b>	0,2218	1,39	95,99
<b>CP 10</b>	0,1975	1,23	97,22
<b>CP 11</b>	0,1418	0,89	98,11
<b>CP 12</b>	0,0928	0,58	98,69
<b>CP 13</b>	0,0801	0,50	99,19
<b>CP 14</b>	0,0582	0,36	99,55
<b>CP 15</b>	0,0494	0,31	99,86
<b>CP 16</b>	0,0223	0,14	100,00

En analysant le tableau précédent on constate que la première composante explique à elle seule plus de la moitié de la variance (**65,42 %**). Et à partir de la troisième, la variance expliquée devient très faible (moins de **6%**). Les deux premiers pourcentages sont exceptionnellement élevés (**75% de variance**).

Si l'on se refait au critère de Cattell, appelé aussi critère de coude, la figure 15, représentant l'histogramme de décroissance des valeurs propres, suggère de garder deux composantes principales.



**Figure 15: Histogramme de décroissance des seize valeurs propres.**

La simple consultation des coordonnées des variables sur le premier axe (CP1) (Tableau 21) montre que toutes les stations sont d'un même côté de l'origine. Une telle disposition traduit le fait que toutes les variables sont corrélées positivement entre elles. Si pour une année une station présente un cumul fort toutes les autres stations prennent une valeur forte pour la même année. Ceci révèle que la première composante représente la répartition temporelle de l'ensemble des précipitations annuelles.

Pour le deuxième axe (CP2), qui explique 9,62 % de la variance totale, on observe une séparation entre valeurs positives et valeurs négatives, la composante principale correspondante est corrélée négativement avec les stations situées dans le sud de la région d'étude et positivement avec les stations situées au nord du bassin versant (Tableau 21).

**Tableau 21: Coordonnées des variables actives sur les axes CP1 et CP2.**

Stations	CP1	CP2	Stations	CP1	CP2
S1	0,70	0,24	S9	0,80	-0,42
S2	0,77	0,38	S10	0,72	-0,34
S3	0,91	-0,03	S11	0,91	0,15
S4	0,93	-0,14	S12	0,84	-0,19
S5	0,72	0,05	S13	0,88	0,29
S6	0,78	-0,06	S14	0,90	0,25
S7	0,63	-0,52	S15	0,81	0,34
S8	0,68	-0,57	S16	0,87	0,30

L'analyse du cercle des corrélations (Figure 16) montre une organisation des stations pluviométriques à l'intérieur de la zone d'étude en trois groupes distincts: Le premier groupe (nord du bassin) est constitué des stations S1, S2 S11, S13, S15, S14 et S16, le second (centre du bassin) regroupe les stations S3, S4, S5, S6 et S12. Le troisième (sud du bassin) est

constitué des stations S7, S8, S9 et S10; la lame d'eau moyenne précipitée dans la partie Sud est de 284 mm. Celle du centre est d'environ 338 mm. La partie Nord reçoit une pluie moyenne de 289 mm.

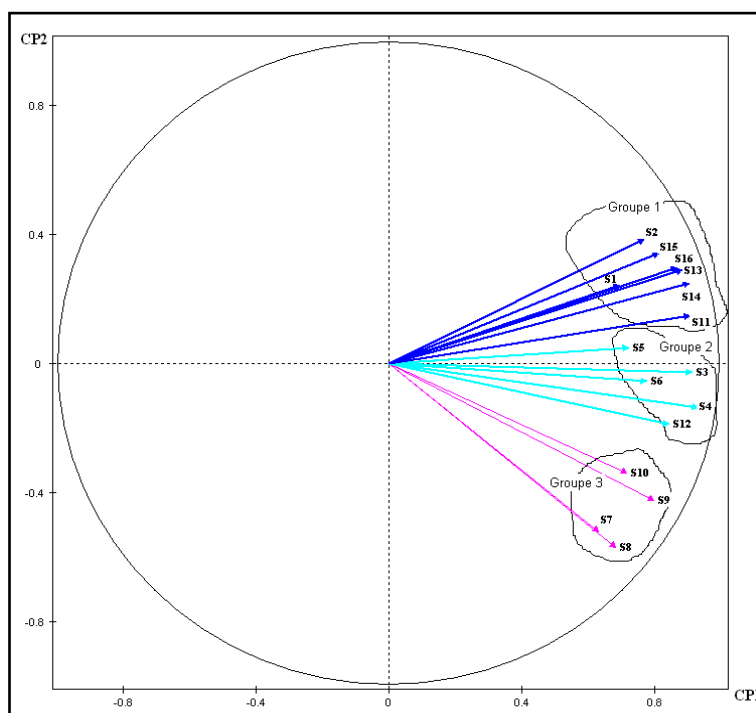


Figure 16: Projection des variables sur le plan factoriel (CP1-CP2).

L'analyse globale de tableau 22 et du graphique des projections des individus sur la première composante principale (Figure 17) ainsi que la variation des valeurs de CP1 en fonction des années d'observations (Figure 18), met en évidence l'alternance de trois périodes, une considérée comme excédentaire s'étalant de 1970 à 1980 avec 1977 année déficitaire et une période déficitaire installée de 1981 à 1993. La période allant de 1993 à 2009 est caractérisée par la succession d'années excédentaires et déficitaires.

Tableau 22: Projection des observations actives sur le plan factoriel (CP1).

Années	CP1	Années	CP1	Années	CP1	Années	CP1
1970	1,137	1980	0,489	1990	-1,359	2000	0,122
1971	9,487	1981	-3,091	1991	-0,535	2001	-1,306
1972	5,238	1982	-2,559	1992	-3,200	2002	-1,045
1973	2,083	1983	-2,450	1993	-3,513	2003	0,852
1974	3,251	1984	-3,018	1994	0,556	2004	-3,649
1975	1,013	1985	-0,672	1995	7,595	2005	1,410
1976	2,089	1986	0,015	1996	-3,533	2006	-3,012
1977	-0,436	1987	-2,693	1997	0,120	2007	-0,398
1978	0,607	1988	-1,006	1998	-3,779	2008	6,765
1979	2,023	1989	-3,786	1999	-4,217	2009	4,405

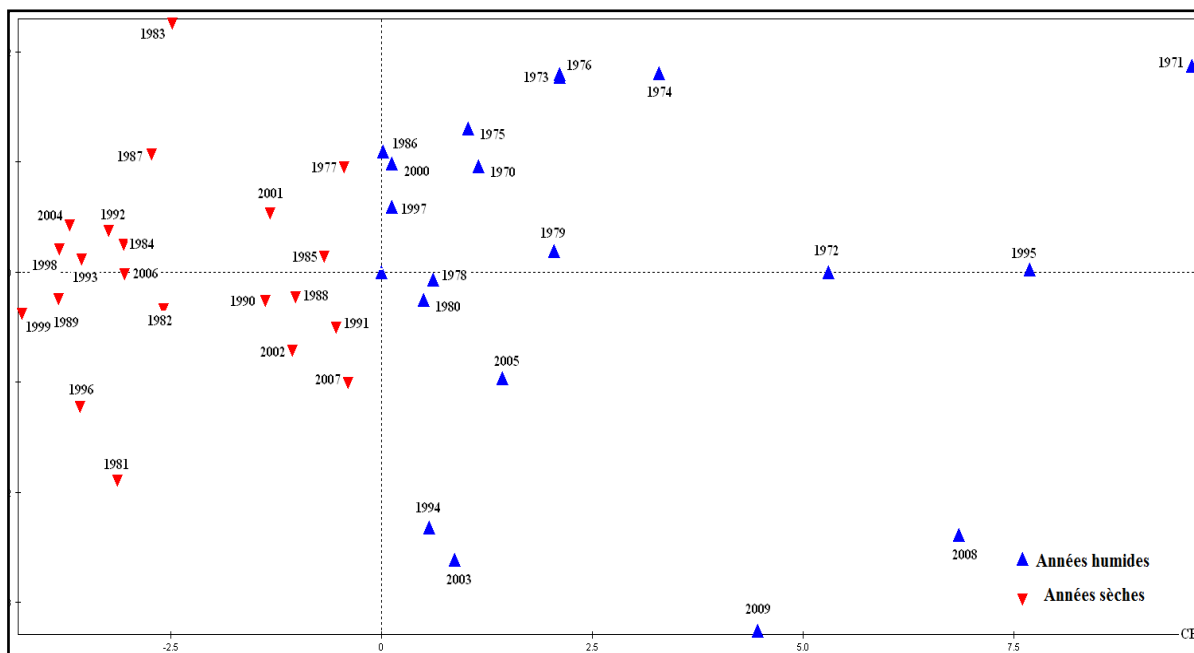


Figure 17:Projection des observations actives sur le plan factoriel (CP1).

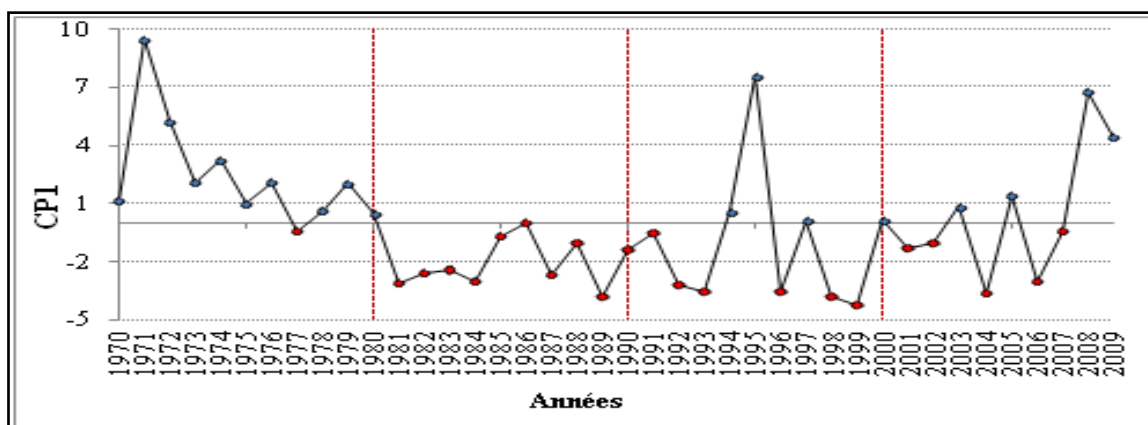


Figure 18:Variation des valeurs de CP1 sur la période 1970/2009.

#### II-2-2-4 Détection de ruptures au sein des séries pluviométriques

Dans le but de caractériser d'éventuels changements dans le régime pluviométrique au pas de temps annuel, dans le bassin versant de l'oued Mina, les séries chronologiques précédentes ont été soumises à des tests statistiques, appelés tests de détection de ruptures.

Selon **Lubès et al., (1994)**, une "rupture" peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique.

Les analyses statistiques ont été menées avec le logiciel Khronostat élaboré par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'université de Montpellier (Boyer et al., 1998). Les tests statistiques de Pettitt (1979), de Lee & Heghinian (1977), U de Buishand (1984) et la méthode de segmentation de Hubert (1989), permettant de déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, sont regroupés dans ce logiciel.

#### II-2-2-4-1 Test de Pettitt

Le test de PETTIT (1979) est non-paramétrique. Il dérive du test de Mann & Whitney. On se propose de tester l'hypothèse  $H_0$  « Absence de rupture dans la série  $(X_i)$  de taille  $N$  » face à l'hypothèse alternative  $H_a$  « Présence d'une rupture dans la séquence ». La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant  $t$  compris entre 1 et  $N$ , les séries chronologiques  $(X_i)$   $i=1$  à  $t$  et  $t+1$  à  $N$  appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$  définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (17)$$

où  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ , avec  $\text{sgn}(X) = 1$  si  $X > 0$ ,  $0$  si  $X = 0$  et  $-1$  si  $X < 0$ .

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant  $t$  définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ .

#### II-2-2-4-2 Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (1977), vise à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. Il s'agit d'une approche paramétrique dont l'application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de celle-ci. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (18)$$

Où les  $\varepsilon_i$  sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .

Les variables  $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\delta$  et  $\sigma$  sont des paramètres inconnus.  $\tau$  et  $\delta$  représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. Le changement éventuel (la position et l'amplitude) correspond au mode des distributions *a posteriori* de  $\tau$  et  $\delta$ .

La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produit au moment  $\tau$  dans une série où on suppose *a priori* qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé.

#### II-2-2-4-3 Statistique U de Buishand

La procédure de Buishand (1982 ; 1984) fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian. En supposant une distribution *a priori* uniforme pour la position du point de rupture  $t$ , la statistique U de Buishand est définie par 2 paramètres:

où

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} S_k}{N(N+1)} \quad (19)$$

$$S_k = \sum_{t=1}^k (X_t - \bar{X}) \quad (20)$$

pour  $k = 1, \dots, N$  et  $D_x$  désigne l'écart type de la série.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de  $(x_i)$ . La variable  $S_k$ , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance  $[k(N-k)\sigma^2]/N$ ,  $k = 0 \dots N$  sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des  $(x_i)$ . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des  $S_k$ .

#### Remarque

La statistique U du Buishand, s'avère performante pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série cependant le test de Buishand est un test paramétrique faisant l'hypothèse d'une distribution normale des variables de la série. *Khronostats* nous permet de vérifier la normalité de la série étudiée et dans le cas où celle-ci ne serait pas validée la série est alors transformée (Racine carrée, Logarithme, Box et Cox) pour que les données transformées suivent une distribution normale (Sebbar, 2011).

#### II-2-2-4-4 Segmentation de Hubert

Le principe de cette procédure (Hubert et al., 1989) est de « découper » la série en  $m$  segments ( $m > 1$ ) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle

méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la façon suivante.

Toute série  $x_i$ ,  $i = i_1, i_2$  avec  $i_1 \geq 1$  et  $i_2 \leq N$  où ( $i_1 < i_2$ ) constitue un segment de la série initiale des ( $x_i$ ),  $i = 1 \dots N$ .

Toute partition de la série initiale en  $m$  segments est une segmentation d'ordre  $m$  de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre  $m$  pratiquée sur la série initiale, on définit :

$$- i_k, K = 1, 2, \dots, m$$

$$- N_k = i_k - i_{k-1}$$

$$X_K = \frac{\sum_{i=i_{(k-1)+1}}^{i=i_k} X_i}{N_k} \quad (21)$$

$$D_m = \sum_{K=1}^{K=m} d_k \quad (22)$$

$$d_k = \sum_{i=i_{(k-1)+1}}^{i=i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2 \quad (23)$$

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre  $m$  de segmentation donnée, l'écart quadratique  $D_m$  soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes. Cette contrainte est satisfaite par application du test de Scheffé (Dagnelie, 1970).

#### II-2-2-4-5 Calcul des variations moyennes

Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture en appliquant selon Ardoin-Bardin (2004); Mahé & Olivry (1995), la formule suivante:

$$Var = \left[ \left( \frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (24)$$

Où  $Var$  est la variation de la moyenne avant et après rupture,  $\bar{X}_j$  représente la moyenne sur la période après la rupture et  $\bar{X}_i$  représente la moyenne sur la période avant la rupture.



## II-2-2-4-6 Analyse des résultats

Les méthodes statistiques utilisées ont permis de situer les années de rupture au sein des séries pluviométriques. Les résultats obtenus sont consignés dans le **tableau 23**.

**Tableau 23: Tests statistiques, années de ruptures et variation dans les séries pluviométriques étudiées.**

	Stations	U max de Buishand	Test de Pettitt	Var après la rupture(%)	Test de Lee et Heghinian	Segmentation de Hubert	Var après la rupture(%)
Stations situées au nord du bassin	S1	Oui	1980	-23	1980	1980	-23
	S2	Oui	1976	-36	1976	1976	-36
	S11	Non	1980	-20	1980	1980	-20
	S13	Oui	1980	-30	1980	1980	-30
	S14	Oui	1980	-26	1980	1980	<b>-26</b>
	S15	Oui	1976	-30	1976	1976	<b>-30</b>
	S16	Oui	1979	-28	1979	1979	-28
Stations situées au centre du bassin	S3	Non	1977	-25	1977	1977	-25
	S4	Non	1980	-24	2007	2007	44
	S5	Oui	1981	-28	1981	1981	-28
	S6	Oui	1999	43	1999	1999	43
	S12	Non	Non	/	2007	2007	54
Stations situées au sud du bassin	S7	Non	Non	/	2007	2007	82
	S8	Non	Non	/	2007	2007	174
	S9	Non	Non	/	2007	2007	93
	S10	Non	Non	/	1972	1972	-37

Il apparait, à travers le tableau précédent et **la figure 19**, une variabilité spatiale et temporelle des dates de ruptures dans le bassin versant de la Mina. L'irrégularité des cumuls pluviométriques et la dispersion des dates de ruptures positives ou négatives montre d'une manière générale deux cas de figure.

- La catégorie des stations caractérisées par une variation négative de moyenne de -23 % à -36 % , dans les décennies 1970 et 1980: les stations concernées sont celles situées dans le nord et le centre du bassin versant, à l'exception de la station de Djilali Ben Ammar (S6) qui a enregistré une augmentation de 43 % dans la moyenne en 1999 signalée par les trois tests.

- La deuxième catégorie recense les stations qui ont enregistrées une rupture positive de 44% à 137% en 2007: il s'agit des stations situées dans le sud du bassin à l'exception de la station Sidi Youcef (**S10**), pour laquelle la variation été négative et survenu en 1972.

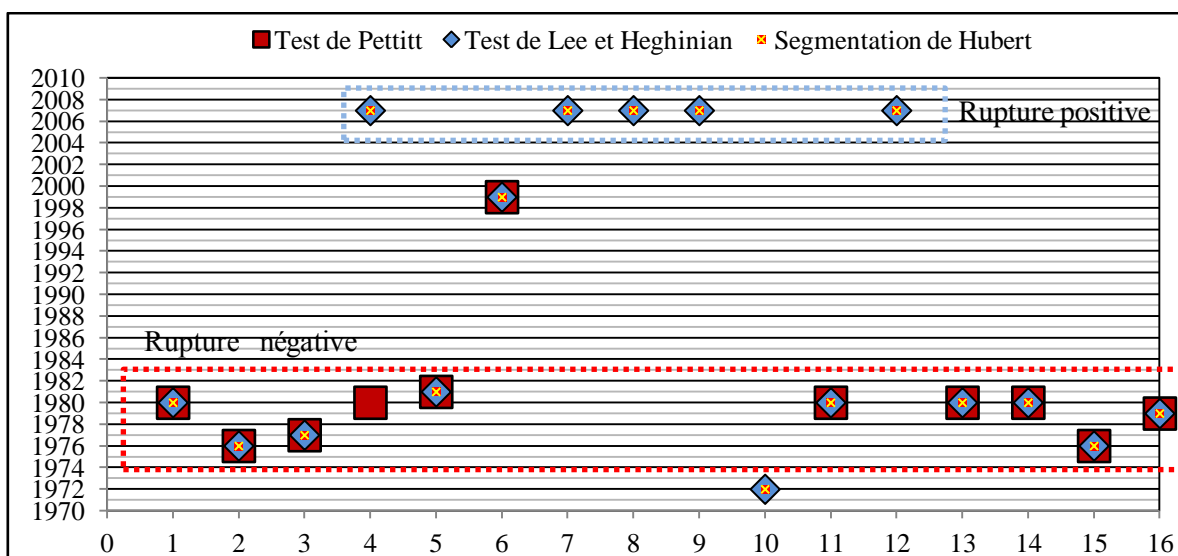


Figure 19: Identification de la période des ruptures entre 1970 et 2009.

**Conclusion**

L'application de l'ACP aux séries pluviométriques a montré une régionalisation des stations dans la zone d'étude (stations situées au Nord, des stations situées au Sud et des stations localisées au centre) et une variabilité temporelle caractérisée par l'alternance de trois phases (période allant de 1970 à 1980 considérée comme humide, décennie 1980 et début 1990 considérée comme sèche et la période qui vient après est caractérisée par l'alternance d'années sèches et humides).

Les méthodes statistiques ont confirmé la transition du régime pluviométrique entre les décennies 1970 et 1980, or on a constaté qu'une baisse moyenne de 30 % de la pluviométrie est enregistrée dans la fin de la décennie 1970 et le début des années 1980. En outre, les tests ont montré une variation positive moyenne de 90% dans les moyennes des précipitations avant et après ruptures pour l'année 2007.

### **III-1 Généralités sur la sécheresse**

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques observés dans le passé et qu'on s'attend d'observer encore sur une longue période (**Khaldi, 2005**).

Connaitre l'évolution et la variabilité récente du climat dans les régions arides et semi arides est une nécessité pour anticiper ce que pourraient être les conséquences sur les milieux et sur les sociétés de ces régions (**Sarr, 2008**).

#### **III-1-1 Définition de la sécheresse**

La sécheresse est un phénomène récurrent du climat. Elle diffère des autres fluctuations climatiques par le fait qu'elle s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années. Elle se produit dans toutes les zones climatiques du globe terrestre mais ses caractéristiques varient d'une région à une autre (**OSS; 2009**). Elle est parmi les catastrophes naturelles les plus complexes. Son début, sa fin et sa sévérité sont souvent difficiles à prévoir.

Contrairement aux autres phénomènes naturels, la sécheresse n'a pas de définition universelle, précise et incontestée (**OSS, 2009**).

Selon le **NDMC (2008)**, l'ensemble de définitions peuvent être classées dans deux catégories: Des définitions conceptuelles qui sont formulées en terme général pour aider les gens à mieux comprendre le concept de la sécheresse et des définitions opérationnelles qui renseignent sur le début, la fin et le degré de la sévérité de la sécheresse.

On considère, de façon générale, qu'il ya sécheresse lorsqu'il se produit, pendant un temps assez long et sur une superficie étendue un déficit des disponibilités naturelles en eau par rapport à la valeur moyenne de ces disponibilités, qu'il s'agit des précipitations, de l'écoulement superficiel ou des nappes souterraines (**Beran & Rodier, 1987**).

#### **III-1-2 Les différents types de sécheresse**

Le caractère essentiel de la sécheresse est qu'elle est liée à un déficit des disponibilités en eau pour un usage spécifique donné, naturellement elle commence comme un évènement climatique et s'étend progressivement à tous les domaines où l'eau intervient.

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

### **III-1-2-1 La sécheresse météorologique**

Elle se caractérise par une réduction ou une mauvaise répartition, voire une absence des pluies dans une région donnée sur une période de temps déterminée (**OSS, 2009**).

Cette variabilité des précipitations est probablement causée par des processus terrestres (tels que les interactions géophysiques et océanographiques), des interactions avec la biosphère et peut-être par des fluctuations de l'énergie du rayonnement solaire (**Ameziane et al., 2007**).

La sécheresse météorologique est souvent définie par un seuil correspondant à un certain déficit de précipitations sur une période de temps déterminée. Le seuil choisi (par exemple 75 % de la normale) et la durée de la période (par exemple six mois) varient d'un endroit à l'autre selon les besoins des utilisateurs ou les applications concernées (**OMM; 2006**).

### **III-1-2-2 La sécheresse agricole**

La sécheresse agricole est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduit significativement les productions agricoles par rapport à la normale ou aux valeurs attendues pour une région de grande étendue (**Khaldi, 2005**).

Elle se définit plus volontiers par la présence dans le sol d'une quantité d'eau insuffisante pour assurer la croissance des cultures et du fourrage que par l'écart des précipitations par rapport à la normale sur une période de temps déterminée (**OMM, 2006**). La quantité d'humidité présente dans le sol et en relation directe avec le taux d'infiltration qui varie à son tour en fonction des conditions d'humidité antérieurs, de la pente, de la nature du sol et de l'intensité des précipitations.

### **III-1-2-3 La sécheresse hydrologique**

Elle est généralement définie comme l'écart de l'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine par rapport à certaines conditions moyennes à différents moments (**OMM, 2006**). Elle est ainsi liée aux conséquences d'un déficit pluviométrique sur le système hydrologique, mais ce lien n'est pas forcément direct. En effet, le niveau d'eau dans les fleuves et les lacs ainsi que dans les aquifères n'est pas en relation linéaire avec le niveau de précipitations, du fait d'abord, des multiples usages des ressources en eau et aussi du décalage temporel entre le déficit de précipitations d'une sécheresse météorologique et son expression

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

au niveau des ressources en eau qui est souvent important, particulièrement en ce qui concerne les ressources en eau souterraines (OSS, 2009).

#### **III-1-2-4 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...) qui sont tributaires des précipitations (OMM, 2006).

#### **III-1-3 La relation entre les différents types de sécheresse**

Les relations entre ces différents types de sécheresse sont illustrées à la **figure 20**, or lorsqu'il y a un déficit pluviométrique (sécheresse météorologique), la sécheresse agricole est la première à être 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 souvent plusieurs semaines de déficit avant que les cultures et les pâturages soient atteints. La persistance d'un temps sec pendant plusieurs mois entraîne une diminution de débit des cours d'eau, une baisse de 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, 20080 in **Rapport OSS, 2009**).

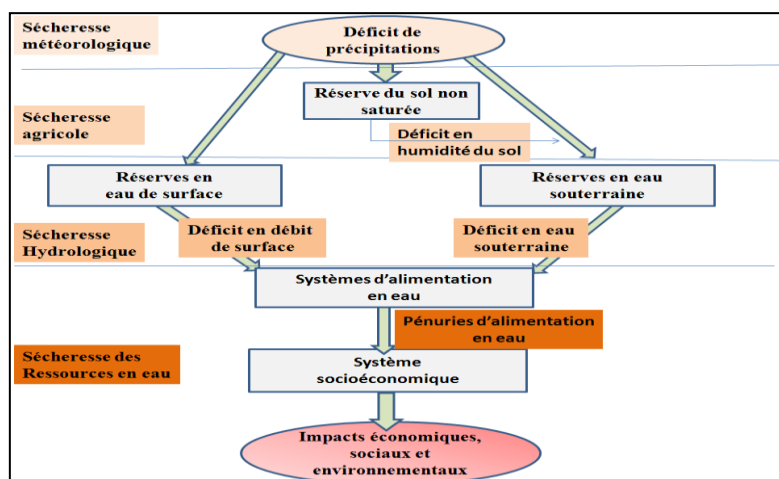


Figure 20: Les différents types de la sécheresse et leurs impacts (Ameziane et al., 2007).

### III-1-4 Les impacts et les risques de la sécheresse

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 & Abida, 2008).

En période de sécheresse, la demande en eau tend à augmenter et l'approvisionnement hydrique pour divers usages (domestiques, agricoles, industriels...) 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, elle dégrade notre environnement et elle porte préjudice à notre économie.

#### III-1-4-1 Les impacts économiques

La productivité des différents secteurs (agriculture, foresterie, pêcheries, énergie hydroélectrique, tourisme, industrie, et activités financières) dépend en grande partie de la distribution temporelle et spatiale des précipitations, ainsi que de la disponibilité des ressources en eau douce. A mesure que la sécheresse persiste la demande en eau augmente et la productivité des différents secteurs diminue entraînant une diminution des offres d'emploi et donc l'extension du chômage.

Les disponibilités restreintes pour l'alimentation en eau et/ou les masses d'eau ainsi que la moindre navigabilité des cours d'eau, fleuves et canaux entraînent des pénalisations dans le secteur du tourisme et des rétorsions économiques graves

La diminution des disponibilités en eau implique une restriction dans la livraison d'eau ce qui entraîne d'une part des réductions des recettes pour les compagnies des eaux et d'autre part l'augmentation des coûts des mesures d'urgence pour améliorer les ressources et

### ***Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina***

diminuer les demandes (coûts additionnels pour le transport et la conduite des eaux, coûts de publicité pour réduire l'utilisation d'eau, etc.).

#### **III-1-4-2 Les impacts environnementaux**

Les régimes de températures et d'humidité font partie des principales variables qui déterminent la distribution, la croissance, la productivité et la reproduction des plantes et des animaux. L'extension des sécheresses entraîne une surexploitation des réserves d'eaux souterraines et superficielles ce qui induit une réduction en terme de quantité et une dégradation de la qualité (extension des pollutions, augmentation de la salinité, pertes dans les lacs naturels et artificiels, dommages aux écosystèmes et à la vie sauvage des zones humides...).

La disponibilité en eau est un facteur essentiel pour la restructuration des systèmes forestiers et des pâturages, une diminution dans les apports d'eau rend les forêts de plus en plus vulnérables aux incendies (destruction des espaces verts, pollution de l'air...), elle peut être la cause principale dans le manque d'aliments du bétail (dommages dans les prairies).

#### **III-1-4-3 Les impacts sociaux**

En affectant la qualité de l'air et de l'eau ou par augmentation des incendies la sécheresse affecte indirectement la santé et la sécurité publique (extension des maladies, chômage, moindres capacités d'épargne, famines, difficultés des soins personnels, abandon d'activités et émigration, réduction des occasions festives et des distractions, perte de propriété...).

#### **III-1-5 L'évaluation de la sécheresse**

Comparé aux autres phénomènes hydrologiques, tel que les inondations, le développement des sécheresses est lent, de plus il est très difficile d'identifier son début et sa fin. Pendant le vingtième siècle, plusieurs indices de sécheresse ont été développés, basés sur différentes variables et paramètres (Svoboda et al., 2002).

La caractérisation de ce phénomène est complexe et elle nécessite une sélection précise des méthodes d'identification et/ou d'indices de sécheresse, capables de décrire de façon claire et synthétique l'évolution des conditions de cette dernière dans l'espace et dans le temps (Ameziane et al., 2007).

L'indice approprié de sécheresse est sélectionné en fonction du type de cette dernière. Certains indices se réfèrent à la sécheresse météorologique et sont basés sur des séries de

### ***Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina***

précipitations, tandis que d'autres sont orientés vers la description de sécheresses hydrologiques ou agricoles ou de pénuries d'eau dans les systèmes urbains d'alimentation en eau (Ameziane et al., 2007).

Dans la suite de ce travail, nous allons se limiter à l'analyse de simple aspect de la sécheresse météorologique, Pour cette raison, on va se contenter de résumer les indices qui caractérisent ce type de sécheresse.

#### **III-1-5-1 Indice de l'écart à la moyenne (Em)**

L'écart à la moyenne est la différence entre le cumul de la pluie pour une année et la hauteur moyenne annuelle des précipitations observées pour une période donnée.

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne (écart négatif) et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée (écart positif) (Khaldi, 2005).

#### **III-1-5-2 Indice de pourcentage à la normale (PN)**

Le pourcentage à la normale ou bien en anglais « Percent of normal » est l'une des mesures les plus simples de l'écart des précipitations par rapport à leur moyenne à long terme (Morid et al., 2007). Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période (Hayes et al., 1999).

#### **III-1-5-3 Indice de pluviosité (IP)**

C'est le rapport du cumul des précipitations d'une année à la hauteur de précipitation moyenne annuelle observée pour une période donnée. L'année est considérée humide si le rapport est supérieur à 1 et elle est sèche dans le cas contraire ( $IP < 1$ ).

#### **III-1-5-4 Rapport à la normale des précipitations (RN)**

Cet indice, qui est exprimé en pourcentage, peut être obtenu en multipliant le quotient de la division de la précipitation annuelle par la précipitation normale par 100. Ce rapport à la normale permet d'estimer la variation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale (Khaldi, 2005).



### **III-1-5-5 Indice des Déciles de précipitation (DI).**

Indice des Déciles de précipitation ou bien en anglais «*The decile index*»; cette approche proposée par **Gibbs & Maher (1967)**, et largement utilisée en Australie, permet de connaître la fréquence d'un événement (**Coughlan, 1987**). Les enregistrements des précipitations mensuelles à long terme sont disposés d'une façon décroissante à fin de construire une distribution de fréquences. La distribution est ensuite fractionnée en dix parties (**Morid et al., 2007**). On aura donc dix déciles qui seront groupés en cinq classes; le cinquième décile représente la médiane et le dixième chiffre le volume maximal de précipitation reçu pour une région donnée et pour une période de temps déterminée.

### **III-1-5-6 Indice de sécheresses de Palmer (PDSI)**

L'indice de sécheresses de Palmer, parfois appelé indice de sévérité de la sécheresse de Palmer et souvent abrégé en PDSI (de l'anglais *Palmer Drought Severity Index*), est élaboré par Wayne Palmer dès 1965, il est basé sur un bilan hydrique réalisé à partir des précipitations, des températures (permettant d'obtenir l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule de Thornthwaite) et de la réserve utile en eau du sol (**Palmer, 1965**).

**Remarque:** La plupart des indices, cités précédemment et destinés à évaluer la probabilité de rencontrer des séquences anormales dans la distribution des précipitations sont conçus à évaluer la sécheresse pour des échelles du temps fixes, tel le PDSI.

### **III-1-5-7 L'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)**

L'indice standardisé de précipitation «**SPI**» (*Standardized Precipitation Index*) est un indice statistique de type probabiliste (**Morid et al., 2007**). Il est calculé en adaptant une fonction de densité de probabilité à la distribution de la fréquence des précipitations sommées (ou moyennées) sur un intervalle de temps donné (**Roudier, 2009**). 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**).

Les valeurs positives de cet indice désignent qu'une année est humide et les valeurs négatives indiquent que l'année est sèche. Selon **Keyantash & Dracup (2002)**, le SPI est actuellement l'outil le plus efficace pour l'analyse de la sécheresse météorologique.

### **III-1-6 Quelques travaux réalisés dans le monde pour la caractérisation de la sécheresse par l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).**

Il existe une grande variété d'indices climatiques dont la finalité est de quantifier la sécheresse météorologique. C'est d'ailleurs sans doute un des thèmes les plus abordés par les indices. Selon **Tommy (2009)**, la plupart de ces indicateurs, sinon l'entièreté, ont été élaborés par et pour les États-Unis, mais ils sont régulièrement employés sur les autres continents. Parmi cette multitude d'indice nous avons décidé de concentrer nos efforts uniquement sur l'application du SPI, de ce fait on va tenter de présenter quelques travaux réalisés dans le monde et dans lesquels la sécheresse est caractérisée via cet indice.

#### **III-1-6-1 EN Asie**

- **EN TURQUIE**

- ❖ **Yildiz, 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 CHINE**

- ❖ **Wu et al., 2001:** Dans leur article, WU et al., ont tenté de comparer les indices: **SPI**, le **China-Z Index** et **Z -score** calculés pour des échelles de temps de 1, 3, 6, 9 et 12 mois, sur des cumuls mensuels de précipitations, pendant la période allant de Janvier 1951 à Décembre 1998. L'étude comptée quatre régions en Chine présentant des climats humides ou arides ainsi que des problèmes de sécheresse et d'inondations.

D'après les résultats obtenus, les auteurs ont constaté que le **CZI** et le **Z-score** peuvent fournir des résultats similaires à ceux obtenus en utilisant le **SPI** pour les différentes échelles de temps avec l'avantage d'être calculé plus aisément que ce dernier.

- **EN INDE**

- ❖ **Panday 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 du SPI de **-1,14** et **-1,24** respectivement.

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

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

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.

#### **III-1-6-2 En Amérique**

- **AU MEXIQUE**

- ❖ **Nunez Lopez et al., 2006:** Les auteurs ont tenté de décrire les principales caractéristiques des épisodes de sécheresse dans l'Etat de Chihuahua durant la période comprise entre 1910 et 2000. Ils ont utilisé les valeurs de l'indice Standardisé des Précipitations, calculées pour trois échelles de temps différentes (courte de -trois mois, moyenne -douze mois et longue -vingt Quatre mois).

En conclusion, ils ont constaté que pour l'échelle de temps courte, les épisodes de sécheresse identifiés dans les trois régions climatiques du Chihuahua sont caractérisés par leur grande fréquence et leurs courtes durées, alors qu'aux échelles de temps moyennes et longues, les périodes de sécheresse ont été moins fréquentes mais plus prolongées.

- **AU CANADA**

- ❖ **Richards & Burridj, 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 de son genre a sévi au Canada en 2001 et ils ont caractérisé la sévérité, la durée et l'extension de cette dernière.

- **AU USA**

- ❖ **WU et al., 2004:** Dans le but d'évaluer l'influence de la longueur des séries pluviométriques sur les valeurs calculées du SPI, les auteurs ont tenté de tester la corrélation entre les valeurs de cet indice obtenues pour des séries de distinctes longueurs.

A la fin de leur étude, Wu et al., (2004) ont affirmé que les valeurs de l'Indice Standardisé des Précipitations calculées pour des séries de différentes longueurs sont fortement corrélées entre elles, dans le cas où la distribution Gamma de fréquence utilisée est la même.

### III-1-6-3 En Europe

- **DANS L'ENSEMBLE DE L'EUROPE**

❖ **Lloyd-Hughes & Saunders, 2002:** Dans cet article, les auteurs ont tenté de caractériser les sécheresses météorologiques qui ont sévi en Europe pendant le 20<sup>ème</sup> siècle. L'étude est basée sur des valeurs de l'Indice Standardisé des Précipitations calculées pour des échelles de temps différentes (3, 6, 9, 12, 18 et 24 mois) et de l'indice de la Sévérité de la Sécheresse de Palmer (PDSI). Les auteurs ont constaté l'existence d'une équivalence entre les valeurs de ce dernier et celles du SPI-9 et SPI-12.

Au terme de cette étude les auteurs ont conclu que la portion de l'Europe, étudiée dans cet article, a subi des sécheresses extrêmes et/ou normales qui se sont variées aléatoirement durant le 20<sup>ème</sup> siècle.

❖ **Tommy, 2009:** L'objectif de cet article est d'analyser et de comparer de manière détaillée deux épisodes de sécheresse estivale qui ont particulièrement marqué les esprits en Europe occidentale en raison de leur intensité: **août 1976** et **août 2003**.

La méthode de comparaison utilisée par l'auteur est basée sur l'utilisation de *Standardized Precipitation Index (SPI)*. Les résultats obtenus indiquent que, contrairement à ce que l'on pourrait penser a priori, les deux vagues de sécheresse présentent d'importantes dissemblances. Or il a pu avancer que 1976 fut une année de sécheresse véritable, tandis que 2003 fut une année caniculaire avec de lourdes conséquences sur la santé humaine.

- **EN POLOGNE**

❖ **Labeledzki, 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 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 GRECE**

❖ **Livada & Assimakopoulos, 2007:** Dans le présent article, la caractérisation spatio-temporelle de la sécheresse est effectuée par l'utilisation de l'Indice Standardisé des Précipitations, calculé pour des cumuls mensuels de précipitations, recueillis dans 23 stations météorologiques réparties sur le territoire Grec. Une classification de la sécheresse est donnée selon son intensité et sa durée. Les résultats obtenus indiquent une décroissance modérée de la

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

sécheresse, de Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est tandis la fréquence de la classe de sécheresse sévère est plus importante dans le sud de pays. Les auteurs ont effectué une comparaison entre le SPI et l'indice d'aridité de De Martonne et ils ont constaté qu'une bonne corrélation existe entre les deux indices.

- **EN SERBIE**

- ❖ **Stricevic R. et al 2011:** Les auteurs ont proposé un algorithme, basé sur des valeurs du SPI calculées pour un grand nombre de stations météorologiques réparties dans la région de Vojvodina, située dans le nord de la Serbie. Selon Stricevic et al., cette méthodologie automatisée peut être d'une très grande importance dans la prise des décisions, concernant la gestion des ressources en eaux, dans les régions susceptibles d'être touchées par la sécheresse.

- **EN ESPAGNE**

- ❖ **Vincente-Serrano, et al 2004:** Pour caractériser la sécheresse dans la région Valence en Espagne, entre 1951 et 2000, les auteurs ont utilisé l'Indice Standardisé des Précipitations calculé pour des données pluviométriques mensuelles et ils ont tenté de déterminer l'évolution générale du phénomène par une analyse en composantes principales.

Au terme de leur étude, les chercheurs ont constaté des différences dans la fréquence, la durée et l'intensité de la sécheresse entre des zones à l'intérieur de la région d'étude et ils ont conclu qu'elle augmente de manière significative de centre vers le nord, alors que dans le reste de la région la répartition spatiale est plus complexe. Ils ont avancé également, que cette variabilité régionale est due à des facteurs locaux.

- **EN ITALIE**

- ❖ **Isabella et al., 2001:** Les auteurs ont tenté de caractériser la sécheresse en Italie, pendant les cinquante dernières années, par l'utilisation de l'Indice Standardisé des Précipitations calculé à différentes échelles de temps. Selon Isabella et al, cette nouvelle application a donné des résultats intéressants et montre que l'indice considéré est un outil, dont l'utilisation peut être généralisée pour le suivi des conditions de la sécheresse en Italie.

- ❖ **Bonaccorso et al., 2003:** Les auteurs ont tenté d'analyser la sécheresse en Sicile pour la période allant de 1926 à 1996. La caractérisation du phénomène est faite au moyen de l'Indice Standardisé des Précipitations et sa variabilité à long terme est démontrée par une Analyse en Composantes Principales appliquée aux valeurs du SPI.

D'après les résultats obtenus, Bonaccorso et al suggèrent que l'île entière est caractérisée par une variabilité de la sécheresse avec une fluctuation de plusieurs années et une tendance vers les périodes plus sèches depuis les années soixante-dix.

#### III-1-6-4 En Afrique

- **EN AFRIQUE DE L'OUEST**

❖ **Raymond et al., 2009:** Pour pouvoir gérer au mieux les ressources en eaux dans le bassin du Volta, situé dans une région semi aride en Afrique de l'Ouest, les auteurs ont tenté de caractériser l'intensité, l'extension régionale et la fréquence de récurrence des sécheresses météorologiques dans cette région par le calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations pour la chronique comprise entre 1961 et 2005.

Par cette méthodologie, la sévérité, l'intensité et les périodes de retour des sécheresses historiques de 1961, 1970, 1983, 1992 et 2001, qui se sont sévies dans la région, ont été évaluées.

❖ **Sarr, 2008:** L'objectif principal des auteurs dans cet article est de permettre une réactualisation d'une analyse plutôt descriptive de la variabilité pluviométrique et de son impact sur la végétation dans la région de Ferlo au Sénégal, qui est fortement sensible aux variations climatiques.

Pour atteindre leur objectif, leurs travaux ont été basés sur deux approches: une consiste en une analyse de l'évolution générale de la pluviométrie en utilisant des outils statistiques et cartographiques choisis selon la problématique posée et d'éventuelles tendances sur les séries de mesures, et l'autre approche vise l'analyse de la production végétale primaire qui se fonde sur une évolution diachronique de l'indice NDVI suivie des changements dans l'occupation du sol grâce à l'imagerie satellitale. A partir des images de télédétection, Sarr et son collaborateur ont constaté une covariance entre les fluctuations mensuelles de la pluviométrie et le comportement de la couverture végétale.

- **EN ETHIOPIE**

❖ **Gebrehiwot et al. 2010:** A partir des données de précipitations et d'images de télédétection, les auteurs ont essayé d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle de la sécheresse météorologique et végétative par l'utilisation de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) et l'indice de la condition de la végétation (VCI) et ce dans le TIGRAY, au nord de l'Ethiopie. Les résultats de l'analyse par SPI et VCI révèlent que les zones orientales et méridionales de la région d'étude ont subi un cycle récurrent de sécheresse au cours de la dernière décennie; et des résultats supplémentaires montrent qu'il ya un décalage entre la période de pointe de l'VCI et les valeurs de précipitation obtenues dans les stations météorologiques à travers la zone d'étude.

### Chapitre III *Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina*

- EN IRAN

❖ **Raziei et al., 2008:** Dans cet article, les auteurs ont effectué une analyse de la sécheresse dans l'Ouest de l'Iran, pour la période allant 1966 à 2000, en utilisant des données mensuelles de précipitations mesurées dans 52 stations météorologiques réparties uniformément dans la région. Les conditions de la sécheresse sont évaluées par l'utilisation de l'Indice Standardisé des Précipitations calculé pour l'échelle de temps 12 mois, et la variabilité à long terme du phénomène est caractérisée par l'application de la méthode d'analyse en composantes principales aux valeurs de cet indice.

Par l'application d'une rotation orthogonale aux deux premières composantes principales, deux sous régions distinctes sont identifiées et qui ont une variabilité climatique différente.

- AU MALI

❖ **Roudier & Mahé, 2009:** Dans le but d'examiner la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques dans le bassin de Bani au Mali, les auteurs Rodier et Mahé ont utilisé en premier lieu l'Indice Standardisé des Précipitations, calculé sur des décades (SPI 10-jours). Et vu le manque de précision constaté vis-à-vis l'utilisation de cet indice, dans la région, ils ont testé un autre indice, plus robuste et crée pour le pas de temps journalier, l'Effective Drought Index (E D I), qui s'est avéré plus précis, même si le SPI possède des atouts importants.

Cette étude à permet aux chercheurs de conclure sur les zones du bassin potentiellement en danger face aux sécheresses (durée, nombre et augmentation dans le temps). Ils ont remarqué également une tendance générale des sécheresses à diminuer en nombre, mais à être plutôt plus longues.

- AU MAROC

❖ **Sebbar 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, et pour se faire en premier lieu, les auteurs ont utilisé 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,

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

une phase normale à excédentaire jusqu'en 1970. Au-delà de cette date, la sécheresse s'est installée d'une manière significative dans toute la région.

- **EN TUNISIE**

- ❖ **Ellouze & Abid, 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, moyen et long terme (3, 12 et 24 mois respectivement). 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.

- **EN ALGERIE**

- ❖ **Achite 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 été exposé à des sécheresses plus sévères et plus longues que le centre et le Nord.

#### **III-2 Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina par l'indice SPI**

Pour évaluer la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Mina on a choisi l'Indice Standardisé des Précipitations qui, est actuellement l'outil le plus efficace pour l'analyse de la sécheresse météorologique (**Keyantash & Dracup, 2002**), et il est employé par de nombreux auteurs dans diverses régions du globe (**Giddings et al., 2005; Wu et al., 2001**).

##### **III-2-1 Intérêt et choix de l'indice standardisé des précipitations**

Le choix de l'Indice Standardisé des Précipitations est dû d'une part à ses nombreux avantages par rapport à ses concurrents et d'autre part à la disponibilité des données de précipitations qui sont le seul paramètre nécessaire à sa détermination, contrairement aux



autres qui nécessite de nombreuses variables qui sont pratiquement inexistantes dans notre bassin versant. Il semble également, d'après les recherches faites que le SPI n'ait jamais été calculé pour le bassin versant de la Mina ce qui constitue une nouvelle approche et une bonne initiative.

#### **III-2-2 Définition et méthodes de calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)**

L'Indice Standardisé de Précipitation (SPI, Standardized Precipitation Index), est mis au point à l'université de Colorado par **Mc Kee et al., (1993, 1995)**, pour l'évaluation des déficits pluviométriques. Selon **Wu et al. (2001)**, **Gidding et al., (2005)**; **Sônmez et al., (2005)** cet appréciable outil d'estimation de la durée et de l'intensité des épisodes secs, à le double avantage d'être utilisé dans différentes régions du globe et de fonctionner à divers échelles de temps (courts, moyens et long terme), de ce fait, il permet le suivi des différents types de sécheresse (météorologique, agronomique et hydrologique).

Les études postérieures ont montrées que le SPI est en bon accord avec les valeurs correspondantes du PDSI (**Keyantash & Dracup, 2002**), et permet l'identification des sécheresses mensuelles plus tôt que ce dernier (**Hayes, 2000**). De plus, le SPI est comparable dans le temps et dans l'espace (**Wu et al., 2004**).

**Gutteman, (1999)** suggère qu'une période inférieure à cinquante ans peut être utilisée dans le calcul du SPI à une échelle inférieure à 12-mois, tandis que des séries plus longues sont exigées dans le calcul de l'SPI-24, SPI-36 et l'SPI-48. Or **Hayes et al., (1999)** considèrent que pour des échelles de temps courtes, une période de trente ans est suffisante.

#### **• Méthodes du calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations**

##### **Méthode directe**

Le calcul du SPI nécessite l'ajustement de série longue de données de précipitations à la distribution Gamma qui, selon **Nunez-Lopez et al., (2006)**, est la distribution qui représente le mieux l'évolution des séries de pluies. Cette distribution Gamma est définie par sa densité de probabilité représentée par:

$$g(X) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} X^{\alpha-1} e^{-\frac{X}{\beta}} \quad (25)$$

Où :

$\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres de forme et d'échelle de la distribution. Ils sont obtenus à partir de la méthode des moindres carrés décrite par **Edwards et Mc Kee, (1997)**.

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

$\Gamma(X)$  représente la fonction mathématique Gamma et  $X$  la hauteur de la précipitation mensuelle.

L'estimation du SPI se fait par ajustement de la distribution des fréquences des précipitations dans chaque station à la distribution Gamma de la densité de la probabilité. Les valeurs des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  de la fonction Gamma sont estimées pour chaque station et pour chaque échelle de temps (**3, 12, 24, 48 mois**) et pour chaque mois de l'année.

En utilisant les paramètres résultants pour trouver la probabilité accumulée d'un épisode de précipitation observé, la probabilité cumulée (fonction de répartition) devient:

$$G(X) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int X^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (26)$$

Si on pose  $t = \frac{x}{\beta}$ , cette équation se transforme en une fonction Gamma incomplète:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (27)$$

Du fait que la fonction Gamma est indéfinie pour  $x = 0$  et qu'une série de précipitations peut contenir des zéros, la probabilité cumulée devient:

$$H(X) = q + (1 - q)G(X) \quad (28)$$

Où

$H(x)$  correspond à la probabilité cumulée quand  $X=0$  et  $q$  est la fréquence de pluies nulles. Dans ce dernier calcul, la probabilité cumulée n'est plus que la variable  $Z$  d'une fonction de distribution normale standard caractérisée par une valeur moyenne de zéro et une variance unité: après cette transformation, la valeur calculée donne la valeur du SPI.

Les valeurs négatives du SPI correspondent à un déficit des précipitations alors qu'à l'opposé les valeurs positives indiquent des pluies supérieures à la normale (Nuñez-Lopez, 2006).

#### **Méthode indirecte :**

Le SPI peut être calculé à l'aide d'un programme informatique qui permet un traitement statistique de la base de données et de donner la valeur de cet indice pour divers échelles du temps (Colorado Climat center, 2003 in NDMC, 2008).

- **L'interprétation de l'Indice Standardisé des Précipitations**

Les valeurs du SPI calculées sont classées selon le schéma proposé par **Mc Kee et al., (1993)**. On se référant à ce système de classification tel qu'il est présenté au **tableau 24** suivant, on considère que l'on est en face d'un phénomène de sécheresse dès lors que les valeurs de l'indice considérée deviennent inférieures ou égales à (- 1).

**Tableau 24: Interprétation du SPI par rapport à ses valeurs et la probabilité associée au non dépassement selon Mck (1993)**

Classe SPI	Probabilités cumulatives de SPI	Interprétations
$SPI \geq 2$	Prob. $SPI \geq 0,9772$	Très Humide ( <b>TH</b> )
$+1,5 \leq SPI < 2$	$0,9332 \leq \text{Prob. } SPI < 0,9772$	Humide ( <b>H</b> )
$+1 \leq SPI < 1,5$	$0,8413 \leq \text{Prob. } SPI < 0,9332$	Modérément Humide ( <b>MH</b> )
$-1 < SPI < 1$	$0,1587 < \text{Prob. } SPI < 0,8413$	Normale ( <b>N</b> )
$-1,5 < SPI \leq -1$	$0,0668 < \text{Prob. } SPI \leq 0,1587$	Modérément Sec ( <b>MS</b> )
$-2 < SPI \leq -1,5$	$0,0228 < \text{Prob. } SPI \leq 0,0668$	Sec ( <b>S</b> )
$SPI \leq -2$	Prob. $SPI \leq 0,0228$	Très Sec ( <b>TS</b> )

- **Les avantages et les inconvénients du SPI**

Le SPI dispose de 3 avantages majeurs (**Lloyd & Saunders, 2002**): il est simple à calculer car il se fonde uniquement sur des données de pluie, il peut être calculé pour des pas de temps variables ce qui permet d'adapter la fenêtre temporelle au but de l'étude, et enfin sa normalisation, issue de sa méthode de calcul, assure que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes est la même partout.

Notons en particulier que si le SPI permet de déterminer le classement d'une sécheresse, on peut aussi calculer sa durée moyenne et la valeur de précipitation à partir de laquelle on passe en sécheresse.

Le SPI possède également quelques inconvénients; Le choix de la distribution utilisée pour modéliser les données est fondamental. À cet effet, la distribution Gamma est globalement acceptée car elle s'ajuste généralement bien aux données de précipitations. Cela n'est cependant pas toujours le cas au niveau des régions arides et semi-arides (**Ntale & Gan, 2003**). Selon **Lloyd Hughes & Saunders (2002)**, « un troisième problème peut apparaître en appliquant le SPI à de petites échelles de temps sur des régions avec des saisons sèches: dans ce cas, des valeurs élevées trompeuses peuvent apparaître ».

### **III-2-3 Etude des périodes sèches et humides dans le bassin versant de la Mina**

En utilisant le programme conçu pour le calcul du SPI, cité dans le paragraphe (III-2-2): des valeurs du SPI-3 mois pour chaque saison (**DJF (hiver)**, **MAM (printemps)**, **JJA (été)** et **SON (automne)**) sont calculées en utilisant des séries de données de précipitations mensuelles pour la station de Sidi M'hamed Ben Aouda (S16). Et également des valeurs du SPI-annuel sont calculées pour chacune des seize stations météorologiques réparties sur l'ensemble du bassin de la Mina par l'utilisation des cumuls annuels pour la période 1970/1971-2009-2010.

#### **III-2-3-1 Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-annuel dans l'ensemble du bassin versant de la Mina.**

##### **III-2-3-1-1 La répartition spatiale des épisodes secs et humides dans le bassin versant**

Une interprétation des valeurs du **SPI** trouvées pour chaque station et pour chaque année sur la période étudiée est donnée dans **le tableau 25** et cela en se référant à la classification proposée par Mc kee donnée dans **le tableau 24**. Ces valeurs du SPI calculées indiquent un début de sécheresse observé durant l'année **1981/1982**, correspondant à l'année d'apparition de la première sécheresse remarquable au niveau de neuf stations sur les seize étudiées.

Les fréquences relatives de chaque classe et pour chaque station sont relevées et mentionnées dans **le tableau 26**.

### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

Tableau 25: Caractérisation de la sécheresse par l'indice (SPI-annuel) des différentes stations pluviométriques étudiées.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
1970	N	H	N	N	TH	N	N	N	MS	N	N	MS	N	N	N	N
1971	N	TH	TH	TH	TH	H	N	MH	MH	MH	TH	H	TH	TH	TH	TH
1972	MH	N	MH	MH	MH	N	N	N	MH	TH	MH	MH	MH	H	MH	MH
1973	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MH	H	MH	MH
1974	H	MH	N	N	N	H	N	N	N	N	N	N	TH	MH	N	N
1975	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MS	N	N	N	N	N	N
1976	H	H	MH	N	N	N	N	N	MH	N	N	N	N	N	MH	N
1977	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N
1978	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MH	N	N	N	N	N	N
1979	N	N	N	N	MH	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MH	N
1980	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MH	N	N	S	N
1981	S	MS	MS	N	N	MS	N	N	N	N	MS	N	MS	MS	MS	S
1982	N	MS	MS	MS	MS	N	H	S	MS	MS	N	N	N	N	N	N
1983	N	N	N	MS	N	MS	S	S	TS	MS	N	MS	N	N	N	N
1984	N	N	N	MS	N	MS	N	N	N	N	N	MS	N	MS	N	N
1985	H	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MS	N	N
1986	N	MS	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MH	N	N	MH	N
1987	N	N	N	MS	MS	N	MS	N	MS	N	N	N	N	N	N	N
1988	N	N	N	N	MS	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
1989	S	MS	S	N	S	S	N	N	MS	MS	MS	N	N	N	N	MS
1990	N	MS	N	MS	N	MS	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
1991	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
1992	N	N	S	N	N	N	MS	N	MS	MS	MS	N	MS	MS	MS	MS
1993	S	N	MS	N	MS	S	MS	MS	N	N	MS	N	MS	MS	N	N
1994	N	N	N	N	N	N	N	MH	N	MH	N	N	N	N	N	N
1995	H	H	TH	H	N	N	H	MH	MH	H	TH	H	H	H	H	TH
1996	N	N	N	N	MS	S	N	N	N	N	MS	N	TS	TS	TS	S
1997	MH	N	N	N	N	N	N	N	MS	MS	N	N	N	N	N	N
1998	N	MS	S	MS	S	MS	MS	N	N	N	S	N	MS	MS	MS	N
1999	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	MS	MS	MS	MS
2000	N	N	MS	N	N	N	MS	N	N	N	N	N	N	N	N	N
2001	MS	N	N	N	N	MH	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
2002	N	MS	N	N	N	MH	N	MH	N	N	N	N	N	N	N	MS
2003	MS	TS	MS	MS	N	N	S	N	MS	N	N	MS	N	N	N	N
2004	N	N	MH	N	MH	MH	N	N	N	MH	N	N	N	N	N	N
2005	MS	MS	N	MS	N	N	N	N	N	S	MS	N	N	N	N	N
2006	S	N	N	N	N	N	N	N	H	N	N	N	MS	N	N	N
2007	MS	N	H	TH	H	TH	H	TH	H	MH	MH	MH	N	N	N	N
2008	N	N	N	MH	N	N	H	TH	H	MH	N	H	MH	H	MH	N
2009	N	N	N	MH	N	N	H	TH	H	MH	N	H	N	N	N	N

En suivant l'évolution de l'indice Standardisé des Précipitations durant la période étudiée, nous avons pu estimer qu'en terme de fréquence cette méthode indique un pourcentage moyen de **17%** d'années sèches dont **1%** seulement représente une sécheresse extrêmement élevée, contre **16%** d'années humides et **67%** d'années normales (**Tableau 26**). Il apparaît néanmoins dans la zone d'étude plus d'années très humides et d'années humides que d'années très sèche et sèches, mais en contre partie les années modérément sèches sont nettement supérieures aux années d'humidité modérée.

**Tableau 26: Fréquence (%) de l'indice de sécheresse (SPI) à l'échelle de bassin versant de la Mina.**

SPI	Très Humide	Humide (1,99à1,5)	Modérément Humide	Normale (+0,99 à -0,99)	Modérément Sèche	Sèche (-1,5 à -1,99)	Très Sèche
S1	0	10	5	65	10	10	0
S2	2,5	7,5	2,5	65	20	0	2,5
S3	5	2,5	7,5	65	12,5	7,5	0
S4	5	2,5	7,5	65	20	0	0
S5	5	2,5	7,5	67,5	12,5	5	0
S6	2,5	5	7,5	65	12,5	7,5	0
S7	0	12,5	0	70	12,5	5	0
S8	7,5	0	10	72,5	2,5	7,5	0
S9	0	10	10	60	17,5	0	2,5
S10	2,5	2,5	17,5	60	15	2,5	0
S11	5	0	5	72	15	2,5	0
S12	0	10	10	70	10	0	0
S13	5	2,5	7,5	67	15	0	2,5
S14	2,5	10	2,5	65	17,5	0	2,5
S15	2,5	2,5	15	65	10	2,5	2,5
S16	5	0	5	75	10	5	0
moy	3	5	8	67	13	3	1

Par ailleurs, on peut dire que le bassin versant étudié est caractérisé par une alternance d'épisodes normaux, secs et humides représenté selon leur intensité comme suit

- **Episodes humides:** Ils représentent les années où la valeur du SPI calculée est supérieure ou égale à (+1), illustrés dans **la figure 21** par la couleur bleue, elles regroupent les classes suivantes:

- Classes Très Humides (TH):** leur existence dans l'ensemble des stations est très faible, la fréquence la plus élevée est de (7,5 %), enregistrée à la station **S8 (Tableau 26)**.

- Classes Humides (H):** une fréquence maximale de (12,5 %) correspondant à cinq événements enregistrés à la station **S7**.

- Classes Modérément Humides (MH):** elles sont observées dans l'ensemble des stations avec une fréquence moyenne de (8 %). L'apparition la plus importante est enregistrée à la station **S10** avec une fréquence de (17,5 %).

- **Episodes secs:** Ils représentent les années où la valeur calculée du SPI est inférieure ou égale à (-1), ils sont illustrés dans **la figure 21** par la couleur rouge et comptent les classes suivantes:

- Classe Très Sèche (TH):** Sa fréquence d'apparition est très faible (2,5 %) correspondant à **un** événement au maximum observé dans les stations (**S2, S9, S13, S14 et S15**).

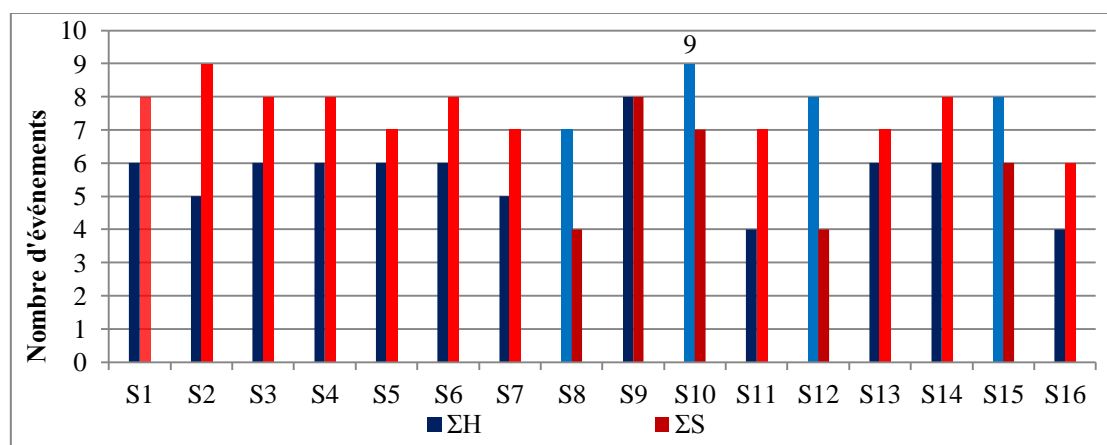
### Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

-**Classe Sèche (S)**: son maximum d'apparition est de quatre événements (10%), observé dans la station **S1**, pour le reste des stations, les fréquences d'apparition variées entre 0 et 7,5 %.

-**Classe Modérément Sèche (MS)**: elle est enregistrée dans toutes les stations, la fréquence la plus importante (20%) est enregistrée dans les stations (**S2** et **S4**).

- **Episodes normaux** : ils représentent les années où la valeur calculée du SPI est comprise entre (+0,99 et -0,99). Ils sont en moyenne, les plus répandus dans le bassin versant avec une fréquence moyenne de **67%**.

En analysant **la figure 21**, on constate que les stations (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S11, S13, S14 et S16) présentent des événements d'épisodes secs nettement supérieurs aux épisodes humides tandis que les stations (S8, S10, S12 et S15) enregistrent des fréquences plus élevées d'épisodes humides dont la plus importante est enregistrée à la station S10. La répartition spatiale des épisodes humides et secs sur l'ensemble du bassin versant est complètement aléatoire.



ΣH: total épisodes Humide; ΣS: total épisodes secs.

**Figure 21: Histogramme de la somme des classes humides et sèches du SPI-annuel pour chaque station durant la période étudiée.**

#### **III-2-3-1-2 La répartition temporelle des épisodes secs et humides sur la période étudiée**

Les variations interannuelles de la pluviométrie dans les stations étudiées, sont caractérisées par une alternance d'années humides, normales et sèches. Une illustration des différents découpages obtenus pour les seize stations, est donnée par les graphes de **la figure 22**.

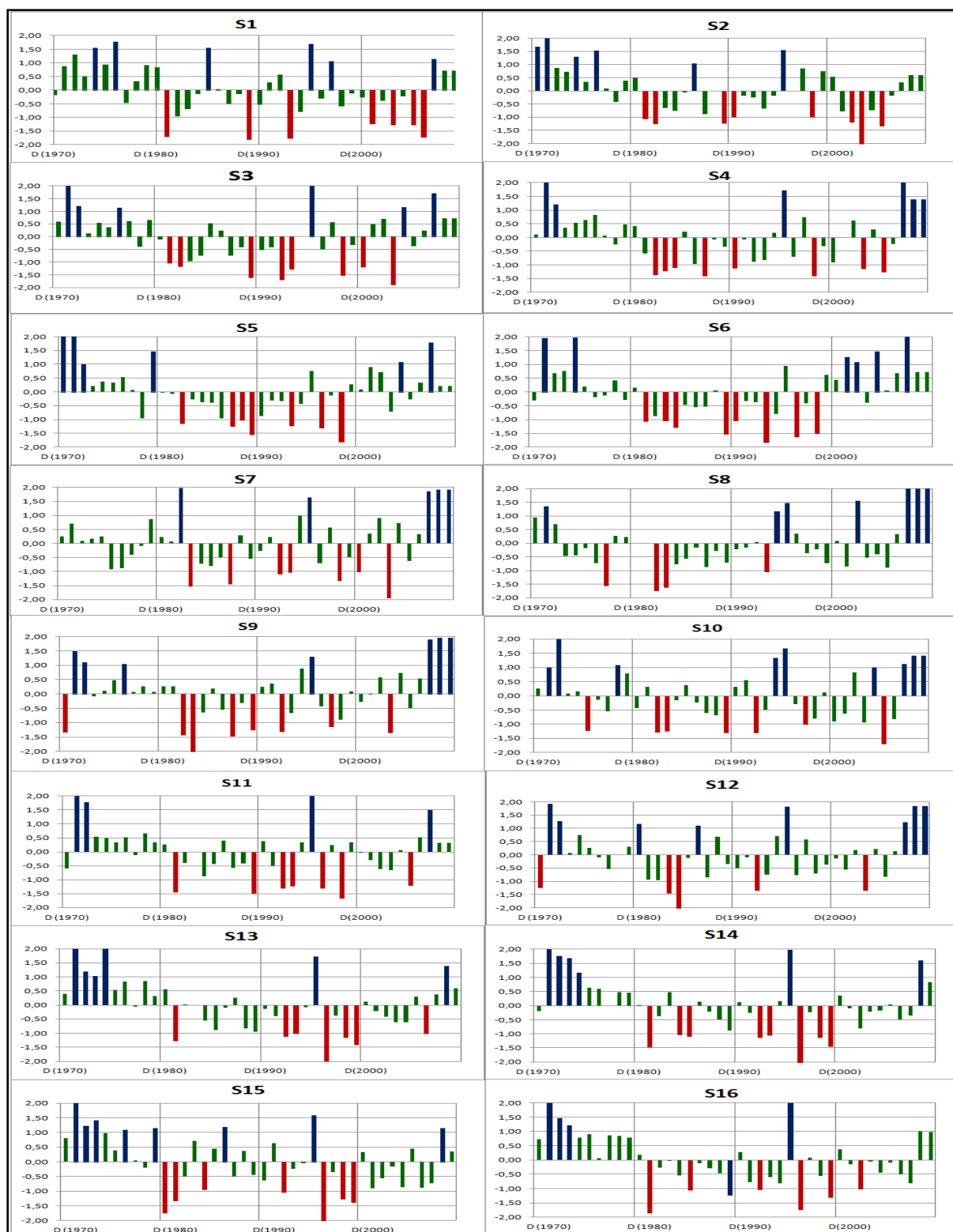


Figure 22: L'évolution du SPI sur la période d'étude de chacune des stations étudiées.

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 1970 et une tendance à la baisse à partir des années 1980. L'analyse de la figure 22 permet de mettre en évidence:



### Chapitre III *Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina*

- Une phase humide installée dans la région pendant la décennie 1970, dont plus de 75% des stations présentent un  $SPI \geq +1$  pendant les années 1971 et 1972.
- Une phase sèche s'est installée pendant les décennies 1980, 1990 et 2000. A l'exception des années 1994, 1995, 2007, 2008 et 2009 où on a constaté une tendance à la hausse de la pluviométrie (87 % des stations ont un  $SPI \geq +1$  pour l'année 1995 et plus de 60% pour l'année 2007). En revanche, on constate que pendant les décennies 1980 et 1990 un nombre très élevé de stations est affecté par la sécheresse, à savoir, durant les années 1981, 1989, 1992 et 1993 où plus de 56% des stations présentent un  $SPI \leq -1$ .

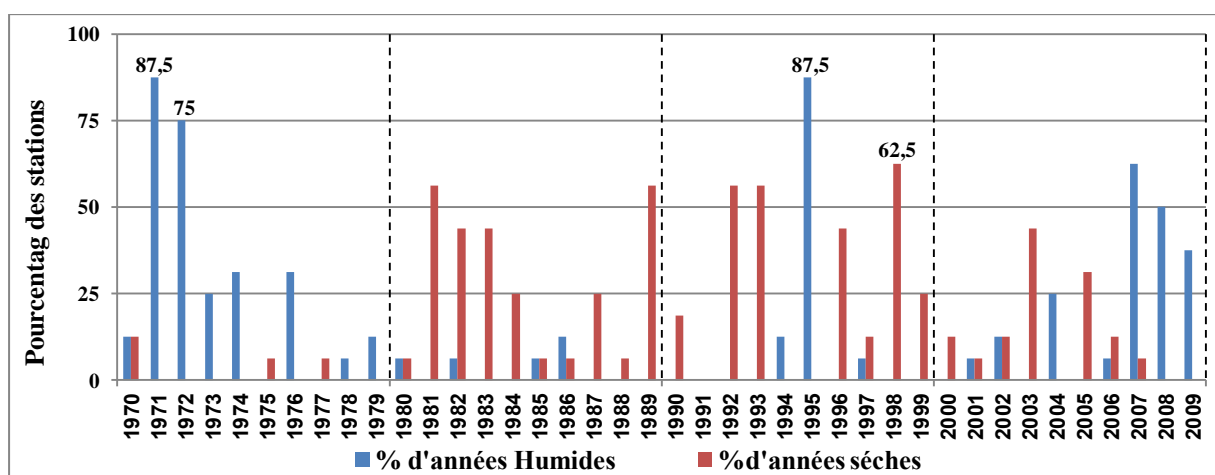


Figure 23: Pourcentage de stations météorologiques indiquant des valeurs du  $SPI \leq (-1)$  et  $\geq (1)$ .

#### III-2-3-1-3 La répartition spatio-temporelle des classes humides et sèches dans l'ensemble du bassin versant de la Mina pour la période allant de 1970 à 2009.

En analysant la figure 24, représentant la répartition géographique des classes du SPI-annuel dans le bassin versant de la Mina, de chaque station et pour chaque année de la période retenue, on peut tirer les conclusions données dans le tableau 27.

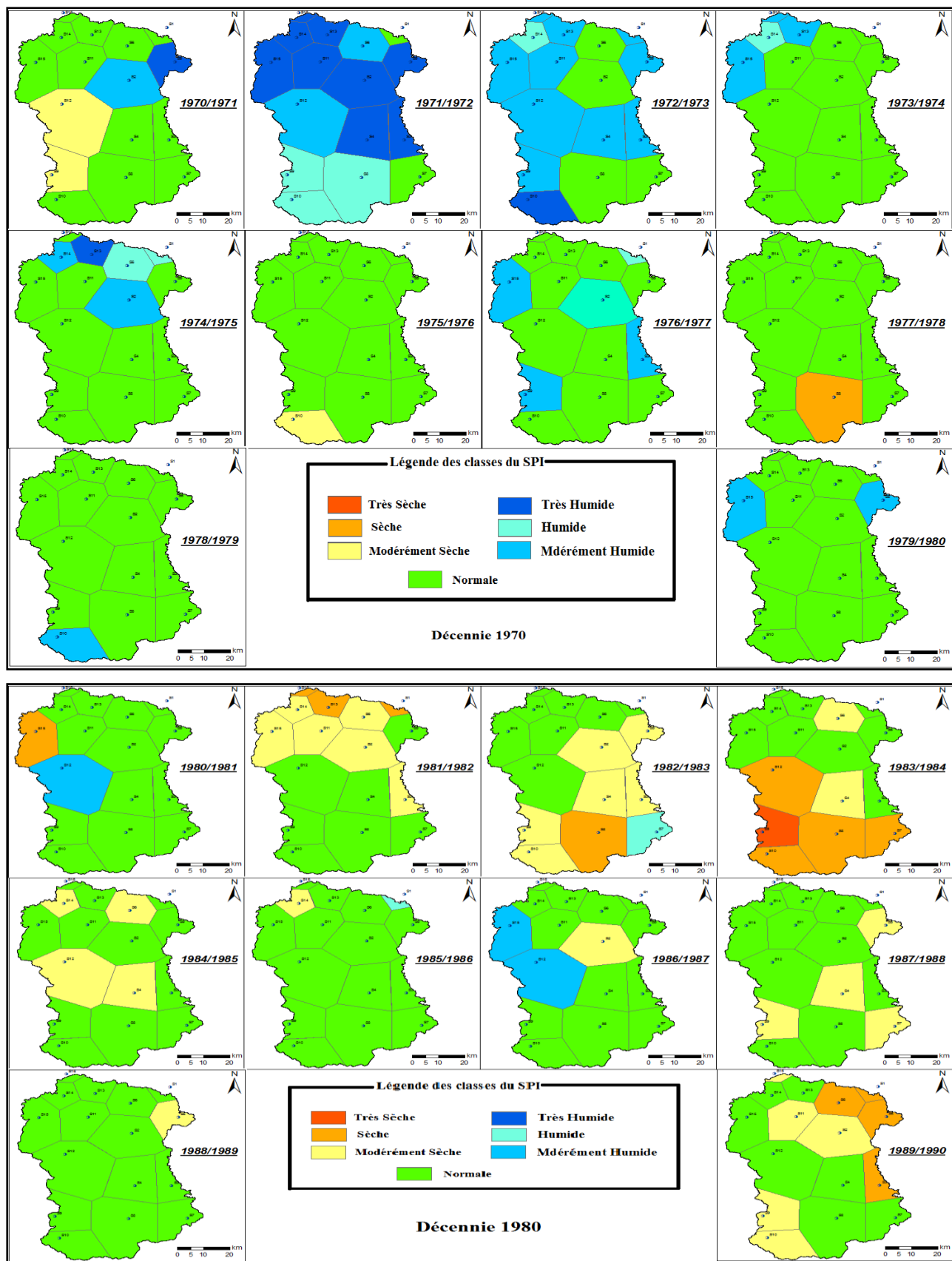


Figure 24: Répartition géographique des classes du SPI-annuel, de chaque station et pour chaque année, sur la période d'étude dans le bassin versant de la Mina.

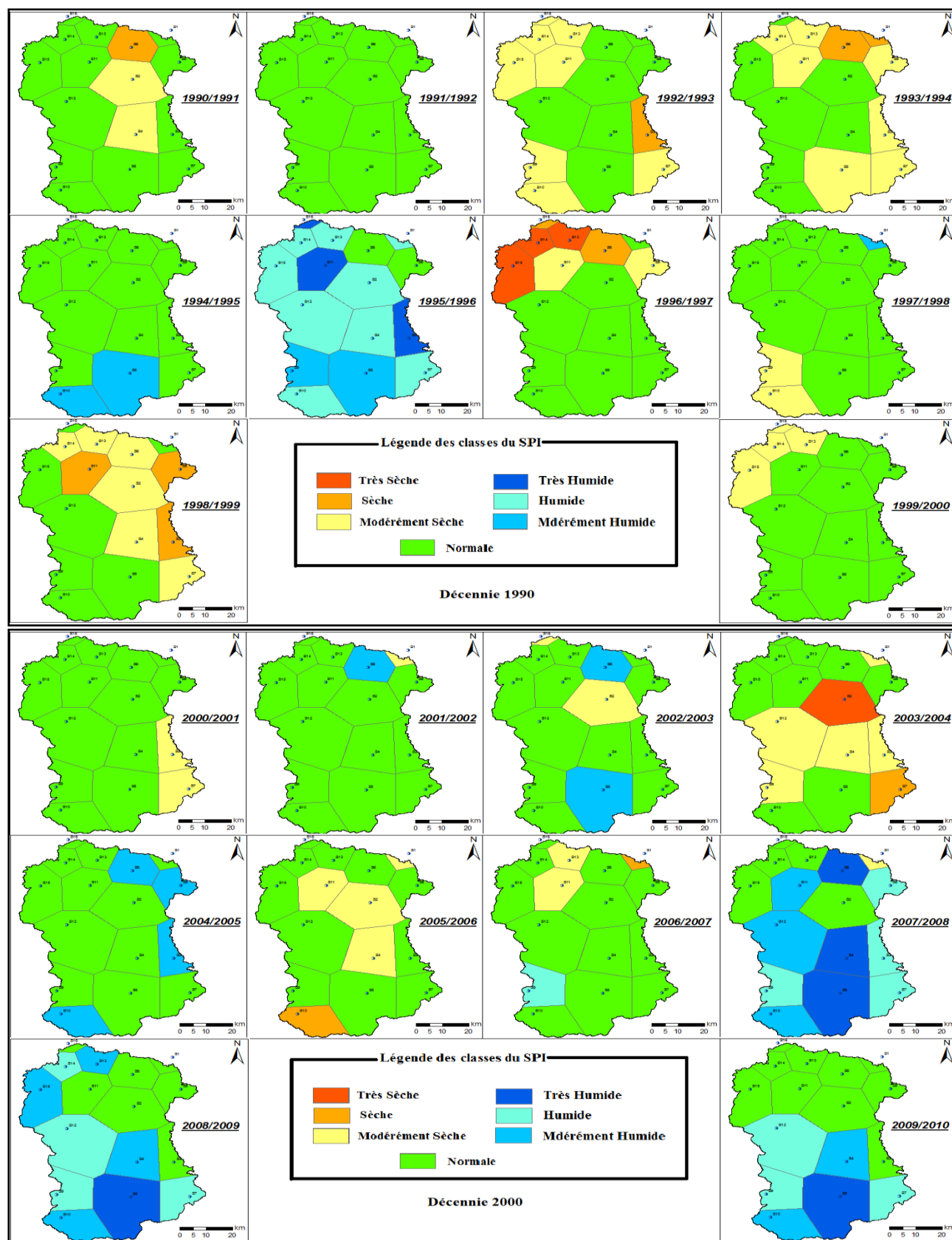


Figure 24 (suite): Répartition géographique des classes du SPI-annuel, de chaque station et pour chaque année, sur la période d'étude dans le bassin versant de la Mina

## *Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina*

**Tableau 27: Les années sèches et humides dans le bassin versant de la Mina.**

Années représentant l'absence de la sécheresse sur la totalité du bassin		Années représentant de la sécheresse dans quelques stations dans le bassin			
Années Humides	Années Normales avec stations Humides	Année Humide	Années normales avec stations Humides	Années Normales sans stations Humides	Années Sèches
-1971/1972 (14 Sts H)	-1973/1974 (4 Sts H)		-1970/1971 (2 Sts H, 2 Sts S)	-1975/1976 (1St S)	-1981/1982 (9 St S)
	-1974/1975 (5 Sts H)		-1980/1981 (1St H, 1 St S)	-1977/1978 (1 St S)	
-1972/1973 (12 Sts H)	-1976/1977 (5 Sts H)		-1982/1983 (1 St H, 7 Sts S)	-1983/1984 (7 Sts S)	-1989/1990 (9 Sts S)
	-1978/1979 (1 St H)		-1985/1986 (1 St H, 1St S)	-1984/1985 (4 Sts S)	
-1995/1996 (14 Sts H)	1979/1980 (2 St H)		-2007/2008 (10Sts H, 1St S)	-1987/1988 (4 Sts S)	-1992/1993 (9 Sts S)
	-1991/1992 (0 St H)		-1986/1987 (2 Sts H, 1 St S)	-1988/1989 (1 St S)	
-2008/2009 (9 Sts H)	-1994/1995 (2 Sts H)		-1997/1998 (1St H, 2 Sts S)	-1990/1991 (3 Sts S)	-1993/1994 (9 Sts S)
	-2004/2005 (4 Sts H)		-2001/2002 (1 St H, 1St S)	-1996/1997 (7 Sts S)	
-2009/2010 (7 Sts H)	-2009/2010 (7 Sts H)		-2002/2003 (2 Sts H, 2Sts S)	-1999/2000 (4 Sts S)	-1998/1999 (9 Sts S)
			-2006/2007 (1St H, 3Sts S)	-2000/2001 (2 Sts S)	
			-2003/2004 (7 Sts S)		
			-2005/2006 (5 Sts S)		

### III-2-3-2 Caractérisation de la sécheresse par l'indice SPI-3 pour la station de SMBA (S16)

Selon **Rodier et al., (2009)**, l'un des avantages majeurs de l'Indice Standardisé des Précipitations, est la possibilité de son calcul pour des pas de temps variables ce qui permet d'adapter la fenêtre temporelle au but de l'étude.

Dans notre cas, et vu le but recherché dans l'étude, on a calculé l'Indice Standardisé des précipitations à l'échelle de temps trois mois, pour chaque cumul saisonnier (**DJF (hiver)**, **MAM (printemps)**, **JJA (été)** et **SON (automne)**). Une interprétation des valeurs du SPI-3 trouvées pour chaque saison de la période allant de 1971/1972 à 2010/2011 est donnée dans le **tableau III à l'annexe**, 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  $SPI \leq -1$ .

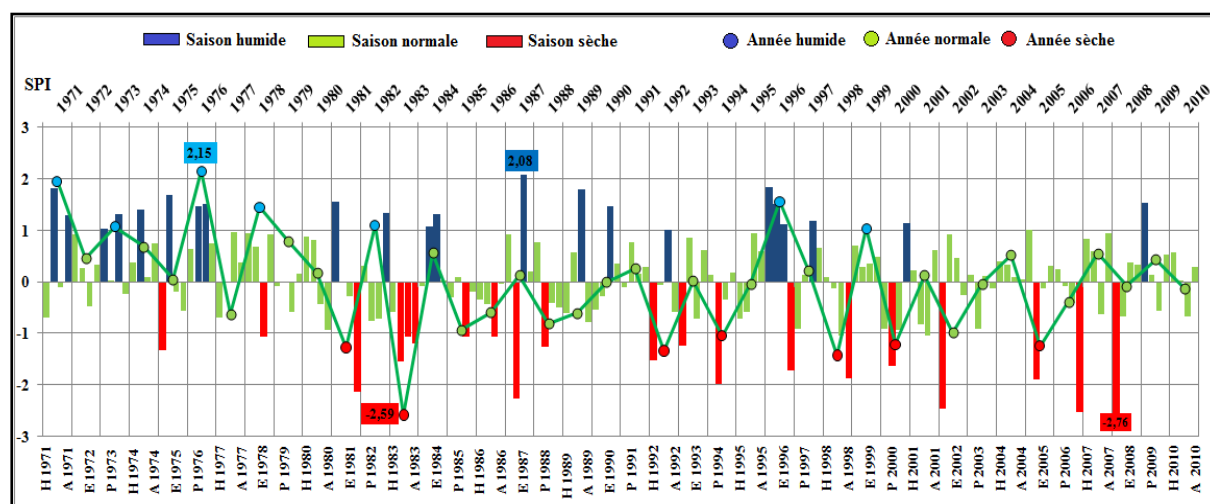
En analysant le **tableau 25** et la **figure 26**, on peut constater que les sécheresses saisonnières qui sont survenues dans la région pendant la période allant de **1971/1972** à **2010/2011**, sont principalement printanières avec la fréquence d'observation la plus élevée (**15 %**), les années d'apparition de ces sécheresses sont (**1983, 1987, 1988, 1994, 2000** et

## Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina

2005). Les sécheresses d'automne et d'hiver sont survenues avec une fréquence de **12,5 %**, les premières sont enregistrées pendant les années (1981, 1983, 1996, 1998 et 2006) et pour la saison d'hiver les années sèches sont (1975, 1992, 1993, 2002 et 2008). La fréquence la plus faible est attribuée à la saison estivale (10 %).

**Tableau 28: Fréquence (en %) de l'indice de sécheresse (SPI-annuel) et (SPI-3) pour les quatre saisons à la station de Sidi M'hamed Ben Aouda (S16).**

Saisons	Humide	%	Normale	%	Sèche	%
HIVER (DJF)	5	10	31	77,5	5	12,5
PRINTEMPS (MAM)	6	15	28	70	6	15
ÉTÉ (JJA)	9	22,5	27	67,5	4	10
AUTOMNE (SON)	3	7,5	32	80	5	12,5
ANNEE	6	15	27	67,5	7	17,5



**Figure 25: Evolution du SPI-annuel et SPI-3 pour les quatre saisons à la station S16 pour la période 1971/2010.**

### Conclusion

En résumé, pour l'échelle annuelle et sur l'ensemble du bassin versant, on peut mettre en évidence les observations suivantes:

- ❖ Quatre années exceptionnellement Humides, à savoir, les années **1971/1972, 1972/1973, 1995/1996, 2007/2008 et 2008/2009.**
- ❖ Cinq années exceptionnellement sèches, à signaler **1981/1982, 1989/1990, 1992/1993, 1993/1994, 1998/1999.**

### *Chapitre III Caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la Mina*

❖ Les trente années restantes sont considérées comme normales, dans les quelles on peut rencontrer quelques stations sèches et/ou humides, à l'exception de l'année **1991/1992** dans laquelle l'ensemble des stations sont normales.

A l'échelle saisonnière on peut dire que les sècheresses qui ont survenus dans la région été principalement printanières, hivernales et automnales.

## **IV-1 Caractéristiques générales des eaux naturelles**

Dans la nature, on peut signaler d'une part les petites ressources en eau comme l'humidité de l'air et l'humidité du sol que certains animaux et plantes en profitent. Et d'autre part les grandes ressources d'eau dont: l'eau des pluies (précipitations), l'eau de mer, l'eau de surface et les eaux souterraines (**Rakotondrabe, 2007**).

Lorsque l'eau de pluie tombe sur le sol, elle peut ou non y pénétrer. On conçoit aisément que suivant la nature du sol, l'eau s'infiltré ou ne s'infiltré pas dans les nappes d'eau souterraines (**Valiron, 1989**). Les eaux superficielles et souterraines sont les deux principales sources utilisées par l'homme pour satisfaire ses différents besoins (domestiques, industriels et agricoles).

### **IV-1-1 Eaux souterraines**

Les formations géologiques poreuses et perméables qui ont la propriété de permettre l'infiltration, le stockage et l'écoulement des eaux constituent les aquifères et les réservoirs des eaux souterraines. Leurs ressources en eau proviennent de la partie des eaux de pluie non reprise par l'évaporation, la végétation ou le ruissellement (**Roux, 2000**).

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. Les aquifères superficiels sont très proches des activités humaines et leurs eaux peuvent aisément être contaminées (**Olivier, 2005**). Lorsqu'une nappe souterraine a été polluée, il est très difficile de récupérer sa pureté originelle: les polluants ayant contaminé la nappe sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également fixés et adsorbés sur les roches et les minéraux du sous-sol (**Degrement, 1989**).

### **IV-1-2 Eaux superficielles**

L'eau de surfaces inclue toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (les eaux des ruisseaux, des rivières et fleuves, des lacs et marais, des étangs et des petites dépressions fermées). Elle a pour origines les eaux qui proviennent à la fois de la fonte des neiges, glaces et du ruissellement des eaux de pluie.

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble du bassin versant. Elles sont généralement polluées bactériologiquement, de plus, elles peuvent présenter plusieurs pollutions d'origine: urbaine, industrielle et agricole.

☒ Principales différences entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Les éléments caractéristiques des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau 29: Principales différences entre les eaux souterraines et les eaux de surface.**

Caractéristiques examinées	Eaux superficielles	Eaux profondes
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité, matières en suspension	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Minéralisation	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets, etc.	Sensiblement constante, en général nettement plus élevée que dans les eaux
Fer et Manganèse bivalent (à l'état dissous)	Généralement absents, sauf au fond des pièces d'eau en état	Généralement présents
Gaz carbonique agressif	Généralement absent	Souvent présent en grande quantité
Oxygène dissous	Souvent au voisinage de la saturation	Absence totale la plus part du temps
Ammoniac	Présent seulement dans les eaux polluées	Présence fréquente sans être un indice systématique de pollution
Sulfure d'hydrogène	Absent	Souvent présent
Silice	Teneur modérée	Teneur souvent élevée
Nitrates	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée risques de méthémoglobinémie
Eléments vivants	Bactéries (dont certaines pathogènes), virus, plancton	Ferro bactéries fréquentes
Polluants et micropolluants organiques et minéraux liés à l'activité humaine	Risques importants	Risque faible

Source (Valiron, 1989).

**Remarque**

A travers ce tableau, on peut retenir que les eaux de surface sont plus vulnérables, face aux divers polluants que les eaux souterraines. En conséquence, elles ne peuvent servir directement pour la consommation domestique. Elles doivent subir un traitement particulier qui permet leur potabilisation.

Dans la suite de cette synthèse bibliographique et pour ne pas sortir du cadre du travail on va axer l'étude sur les eaux de surfaces.

**IV-1-2-1 Pollution des eaux de surface**

L'eau est un élément indispensable pour la vie et pour le développement socio-économique réel et durable d'un pays. Les facteurs climatiques (extension des sécheresses,



augmentation des températures, etc.), la croissance démographique, l'augmentation des besoins et l'extension des pollutions feront que les Hommes auront de moins en moins d'eau pure à partager.

Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où elle présente un danger pour l'environnement (**Castany, 1982**). Les pollutions d'origine anthropique sont liées à l'activité agricole, industrielle ou bien aux diverses utilisations domestiques de l'eau.

#### ▪ **Pollution urbaine**

La population active, délaissant les campagnes, s'est rapprochée et développée autour des centres industriels, créant ainsi de grandes villes dont les habitants déversent quotidiennement leurs flux polluants dans un milieu récepteur pouvant être un lac, une rivière ou une mer (**Gaid, 1984**).

La ville engendre une pollution par les eaux usées domestiques et les eaux pluviales. La production d'eau domestique, conditionnée par le degré de consommation d'eau est proportionnelle à la densité du tissu urbain. Le volume d'eaux usées rejeté par habitant et par jour, généralement, croît avec la taille de l'agglomération. Il varie aussi suivant les régions et leur niveau de développement (**Grosclaude, 1999**).

#### ▪ **Pollution industrielle**

L'industrie constitue une deuxième source de pollution des eaux de surface. La contribution importante des industries à la pollution des eaux s'effectue de plusieurs manières:

- ☒ Par rejet des effluents dans le réseau d'assainissement avec ou sans épuration avant le retour au milieu naturel;
- ☒ Par le rejet direct dans le milieu naturel avec ou sans prétraitement des eaux résiduaires.

#### ▪ **Pollution agricole**

La pollution par l'activité agricole est due à l'utilisation des engrais, des pesticides, des produits phytosanitaires et à moindres degrés l'élevage.

L'épandage des engrais utilisés en agriculture apporte des nitrates, des nitrites, des phosphores, des sulfates et voir même des chlorures. En effet, les eaux de pluie, d'arrosage ou d'irrigation entraînent une partie des engrais non dégradables dans les cours d'eau.

### IV-1-2-2 Différents types de polluants

Un polluant est un agent physique, une substance minérale ou biologique, issue de l'activité humaine, provoquant sous une intensité ou une concentration anormale, une dégradation de la qualité de l'eau naturelle. Le tableau suivant résume les différents types de polluants, leur nature et leur source.

**Tableau 30: Différents types de polluants.**

Type de polluants	Nature	Source
<b>Thermique</b>	Rejets d'eau chaude.	Centrales électriques
<b>Radioactif</b>	Radio- isotopes.	Installations nucléaires
<b>Microbiologique</b>	Bactéries, virus entériques, champignons.	Effluents urbains, élevage, secteur agro-alimentaire.
<b>Organique fermentescible</b>	Glucides, protides, lipides.	Effluents domestiques, agricoles, industrie agroalimentaire, bois.
<b>Fertilisant</b>	Nitrates, phosphates.	Agriculture, lessive.
<b>Métaux métalloïde</b>	Mercuré, calcium, plomb, aluminium, arsenic.	Industrie, agriculture, combustion, pluies acides.
<b>Pesticides</b>	Insecticides, fongicides, herbicides.	Industrie, agriculture.
<b>Détergents</b>	Agents tensioactifs.	Effluents domestiques.
<b>Hydrocarbures</b>	Pétroles bruts et dérivés.	Industries pétrolières, transports.
<b>Composés organochlorés</b>	Insecticides, solvants, chlorés, P.C.B (Polychlorobiphényles).	Industrie.
<b>Autres composés</b>	Nombreuses molécules.	Industrie.

Source (Encyclopédie des sciences de la nature, Larousse, 1995).

### IV-1-2-3 Classes de qualité des eaux du surface

La qualité d'une eau est définie par sa conformité à des normes qui portent sur plusieurs paramètres. La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite à ne pas dépasser ou une limite inférieure à atteindre.

#### ☒ Grille de classification des eaux des barrages et des oueds

Cette grille est basée sur des normes internationales et européennes adoptées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Elle fixe quatre classes de qualité; et chaque classe est illustrée par une couleur.

- **Classe I (couleur bleue):** Eau de bonne qualité, utilisée sans exigences particulières.
- **Classe II (couleur verte):** Eau de qualité moyenne, utilisée après un simple traitement.

- **Classe III (couleur jaune) :** Eau de mauvaise qualité, ne peut être utilisée qu'après un traitement très poussé.
- **Classe IV (couleur rouge):** pollution excessive, ne peut être utilisée qu'après un traitement spécifique et très onéreux.

**Tableau 31: Grille de la qualité physique, minérale et organique des eaux de barrages et des oueds**

Classes paramètres	C I	C II	C III	C IV
<b>Qualité physique</b>				
<b>pH</b>	6,5-8,5	6,5-8,5	<6,5>5,5 ou >8,5<9	>9 ou <5,5
<b>MES (mg/l)</b>	0-30	30 -75	75 -100	>100
<b>Température (°C)</b>	25	25 -30	30-35	>35
<b>Odeur, goût</b>	Sans	sans	sans	
<b>Qualité minérale</b>				
<b>Résidu sec</b>	300-1000	1000-1200	1200 -1600	>1600
<b>Ca<sup>++</sup> (mg/l)</b>	440-100	100 -200	200 -300	>300
<b>Mg<sup>++</sup> (mg/l)</b>	<30	30 -100	100 -150	>150
<b>Na<sup>+</sup> (mg/l)</b>	10-100	100 -200	200 -500	>500
<b>Cl<sup>-</sup></b>	10-150	150 -300	300 -500	>500
<b>So<sub>4</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	50-200	200 -300	300 -400	>400
<b>Qualité organique</b>				
<b>O<sub>2</sub> dissous en (%)</b>	90-100	90-50	50 -30	<30
<b>DCO</b>	<20	20 -40	40 -50	>50
<b>DBO<sub>5</sub></b>	<5	5 -10	10 -15	>15
<b>MO</b>	<5	5 -10	10 -15	>15
<b>Matières azotés</b>				
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/l)</b>	0 à 0,01	0,01 à 0,1	0,1 à 3	>3
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	0 à 0,01	0,01 à 0,1	0,1 à 3	>3
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	0 à 10	10 à 20	20 à 40	>40
<b>Matières Phosphatées</b>				
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (mg/l)</b>	0 à 0,01	0,01 à 0,1	0,1 à 3	>3

Source (ABH-CZ, 2004).

#### IV-1-2-4 Le phénomène d'eutrophisation des eaux de surface

La pollution des eaux de surface est le risque permanent de limitation de la ressource en eau dans un proche avenir.

Dans son évolution, un lac tend naturellement à passer d'un état oligotrophe à un état eutrophe et ce passage, dans les conditions naturelles, demande un temps très long, qu'on peut estimer en milliers d'années.

Les substances (phosphore, azote) présentes dans les eaux usées domestiques, industrielles et produites par l'activité agricole favorisent la croissance d'algues et de plantes aquatiques, ce qui accélère le vieillissement ou bien l'eutrophisation des réservoirs d'eaux de

surface ce qui a fait que le passage d'un état à l'autre est devenu, dans certains cas, perceptible à l'échelle d'une vie humaine. Associe à une diminution considérable dans les réserves d'eau superficielles les conséquences de ce phénomène peuvent être désastreuses pour le tourisme et la pêche; d'autre part, le coût du traitement de l'eau s'en trouve considérablement augmenté, du fait des équipements et des réactifs nécessaires pour éliminer les organismes eux-mêmes ou les produits de leur métabolisme qui sont dans la plupart des cas toxiques et dangereux pour la santé humaine.

### **IV-1-3 Qualité de l'eau d'irrigation**

Les besoins en eau d'irrigation, dépendent de l'espèce et de la variété des plantes cultivées, de leur stade de végétation, ainsi que de la nature et de l'état d'humidité du sol et de facteurs climatiques (précipitations, ensoleillement, vent).

Le choix d'une source d'eau pour irriguer doit dépendre du type et de la concentration des substances qui y sont dissoutes ou en suspension (**Ollier & Poiree, 1986**). Il dépend aussi des caractéristiques physiques et chimiques du sol (**Durand, 1982**). Bien que certaines sources d'eau soient pures, d'autres par contre contiennent des taux élevés de sels, de microorganismes et d'autres résidus. De ce fait la connaissance des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau utilisée pour l'irrigation est indispensable pour éviter des effets négatifs sur les plantes, le système d'irrigation utilisé, le sol, et l'environnement.

#### **IV-1-3-1 Caractéristiques physiques**

##### **☒ Température**

Elle est la qualité physique à considérer en premier lieu. Une eau trop chaude ou froide peut donner lieu à des accidents, surtout sur les jeunes plantes (**Rieul & Ruelle, 2003**).

##### **☒ Particules du sol en suspension dans l'eau**

Ce problème se présente le plus souvent lorsqu'on s'approvisionne avec une eau de surface. Dans certaines conditions ces particules peuvent être fertilisantes, mais la plus part de temps elles contribuent à l'obstruction des interstices des sols lourds et aussi ces matières peuvent obstruer progressivement les émetteurs des tuyaux d'irrigation surtout en irrigation localisée.

### IV-1-3-2 Caractéristiques chimiques

En plus des caractéristiques physiques, il faut connaître les caractéristiques minérales ou chimiques de l'eau d'irrigation. Essentiellement toutes les eaux d'irrigation contiennent des sels dissous. Certains sont utiles même si les eaux en sont très riches; d'autres utiles à faibles doses, et deviennent nuisibles si la teneur s'accroît; d'autre enfin sont nocifs (**Rieul & Ruelle, 2003**). Cette qualité peut être mieux déterminée par une analyse chimique au laboratoire. Cependant le seul dosage de chacun des sels ne peut donner la qualité d'une eau car les sels réagissent parfois entre eux de façon plus au moins connue.

Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont : **La salinité, le sodium, l'alcalinité, le pH de l'eau et en fin la concentration en élément** qui peuvent être toxique pour le végétal (**Couture, 2006**).

#### ☒ La salinité

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), de sodium ( $\text{Na}^+$ ), de potassium ( $\text{K}^+$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) (**Harivandi, 1999**).

#### ☒ Le sodium ( $\text{Na}^+$ )

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Le problème principal avec une grande quantité de cet élément est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. En effet, le sodium peut se substituer aux ions alcalinoterreux des argiles ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et défloculé celles-ci, d'où la détérioration de la structure du sol et une diminution remarquable de sa perméabilité (**Baize, 1988**).

Un excès de sodium peut également être à l'origine de la toxicité chez certaines plantes, or le sodium est absorbé par les cultures en même temps que l'eau et celui-ci se concentre dans les feuilles tandis que l'eau s'échappe par transpiration (**Ayers & Westcot, 1984**). Une fois que la concentration de cet élément atteint le seuil de la tolérance de la culture on peut constater des toxicités qui se manifestent par des brûlures et des dessèchements des feuilles qui aboutissent toujours à une mort certaine du végétal.

#### ▪ Remarque

La salinité et le sodium sont d'importance majeure, car un excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions engendrent une sécheresse physiologique. Même si le sol

semble avoir beaucoup d'humidité, les plants flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par évapotranspiration (**Durand, (1982); Ayers & Westcot, (1988); Harivandi, (1999)**)

#### ☒ pH de l'eau d'irrigation

Le pH est la mesure de la concentration en ions hydrogènes ( $H^+$ ) de la solution, Il est représenté par une expression logarithmique.

Le pH influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation. Il devrait se situer entre **6,5** et **8,4**. À ces valeurs, la solubilité de la plupart des micro-éléments est optimale (**Rieul & Ruelle, 2003**).

#### ☒ Alcalinité et dureté

La dureté de l'eau est essentiellement due au calcium mais également au magnésium et s'exprime par la quantité équivalente de carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ). L'alcalinité, quant à elle, est une mesure du pouvoir de l'eau à neutraliser les acides, c'est un peu comme le « pouvoir tampon de l'eau ».

L'abondance des ions carbonates ( $CO_3^{2-}$ ) et bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans l'eau d'irrigation mérite d'être évaluée. Lorsque l'eau d'irrigation contient un taux de carbonates et de bicarbonates plus élevé que celui de calcium et du magnésium, on constate une tendance à la précipitation de ces deux derniers éléments ce qui fait augmenter le SAR.

Quand tout le  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  apportés par l'eau d'irrigation auront précipité dans le sol sous forme de carbonates de Calcium et Magnésium, l'excès de ( $CO_3^{2-}$  et  $HCO_3^-$ ) sera présent sous forme de carbonates et de bicarbonates de Na (et K) dissous.

#### **IV-1-3-3 Autres éléments**

L'établissement des limites de toxicité pour l'eau d'irrigation est compliqué car les éléments potentiellement dangereux de l'eau peuvent être inactivés par des réactions chimiques ou bien s'accumuler dans le sol jusqu'à atteindre des niveaux de toxicité pour les plantes.

Les substances toxiques qui doivent être considérées attentivement sont le sodium, le chlorure et le bore, elles peuvent causer la baisse du rendement et provoquer l'échec de la récolte (**Ayers & Westcot, 1984**).

- **Le bore** : Il est l'un des éléments essentiels à la croissance des végétaux, mais il n'est nécessaire qu'à doses relativement faibles, en quantités excessives, il devient toxique. Il faut 0,2 mg/l dans l'eau d'irrigation pour la croissance des plantes alors que la toxicité peut apparaître de 1 à 2 mg/l (Ayers & Westcot, 1984).
- **Les chlorures** : Ils peuvent causer des dommages lorsqu'ils sont en trop grande quantité dans l'eau d'irrigation, à plus forte raison lorsque cette dernière est pratiquée par aspersion (Couture, 2006).

#### IV-1-3-4 Caractéristiques biologiques

Il s'agit essentiellement des bactéries et des algues présentes dans l'eau d'irrigation. L'eau pompée directement de puits artésiens pose rarement problème à cet égard. Il peut en être autrement des eaux des barrages ou des rivières.

#### IV-1-4 Classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation

La qualité des eaux pour l'irrigation est conditionnée principalement par la salinité et le risque d'alcalinisation des sols. Pour cette raison plusieurs classifications sont élaborées en se basant sur ses deux paramètres.

1- Les eaux d'irrigation peuvent être classées selon le taux d'absorption du sodium, en anglais (Sodium Absorption ratio(SAR)) qui est calculé par la formule élaborée par (Gapon, 1933) & (Richards, 1954) et elle est formulée comme suit:

$$SAR = Na / \sqrt{(Mg + Ca)/2} \quad \left( \text{en } \frac{\text{m\acute{e}q}}{\text{l}} \right) \quad (29)$$

La classification des eaux selon leur taux d'adsorption de sodium est donnée dans le **tableau 32** suivant:

Tableau 32: classification des eaux selon le S.A.R..

Nomination	Classe	Interprétation
Classe1 (S1)	<b>0 &lt; SAR &lt; 10</b> <b>Bas taux de sodium</b>	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
Classe 2 (S2)	<b>10 &lt; SAR &lt; 18</b> <b>Taux moyen de sodium</b>	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage. Eau utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité.
Classe 3 (S3)	<b>18 &lt; SAR &lt; 26</b> <b>Haut taux de sodium</b>	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigent la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et fort lessivage. L'addition de matière organique, d'amendements chimiques est souvent nécessaire.
Classe 4 (S4)	<b>SAR &gt; 26</b> <b>Très haut taux de sodium</b>	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

Source (Durand, 1982).

2- Il est possible également de classer les eaux d'irrigation selon leur conductivité électrique à 25°C, les classes sont données dans le tableau suivant:

Tableau 33: Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C

Nomination	Classes	Interprétations
Classe 1 (C1)	CE < 250 µS/cm	Eau non saline, utilisée pour l'irrigation de la plupart des cultures et sur différents sols.
Classe 2 (C2)	250 < CE < 750 µS/cm	salinité moyenne, utilisée avec un léger lessivage.
Classe 3 (C3)	750 < CE < 2250 µS/cm	Eau à forte salinité, non utilisable dans les sols à drainage restreint.
Classe 4 (C4)	2250 < CE < 5000 µS/cm	Eau à très forte salinité inutilisable pour l'irrigation.
Classe 5 (C5)	5000 < CE < 20000 µS/cm	Eau à salinité excessive.

Source (Durand, 1982)

3- Dans la plupart des cas et pour la prédiction de l'effet des eaux d'irrigation en considérant les deux critères en même temps (salinisation et sodium), la classification de **Riverside de l'USSL (1954)** est la plus utilisée. Comme il est expliqué dans **la figure 26**, le diagramme de Riverside repose sur le croisement des deux critères:

- le premier est la conductivité électrique (CE) en abscisse, les eaux sont classées de C1 à C4 selon le risque croissant de salinisation (**Tableau 33**). Ce critère vise à quantifier la charge en sels de la solution et par voie de conséquence le risque de salinisation (accumulation de sel dans les sols).
- le second est le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau en ordonnées, les eaux sont classées de S1 à S4 selon le risque croissant d'alcalinisation (**Tableau 32**).



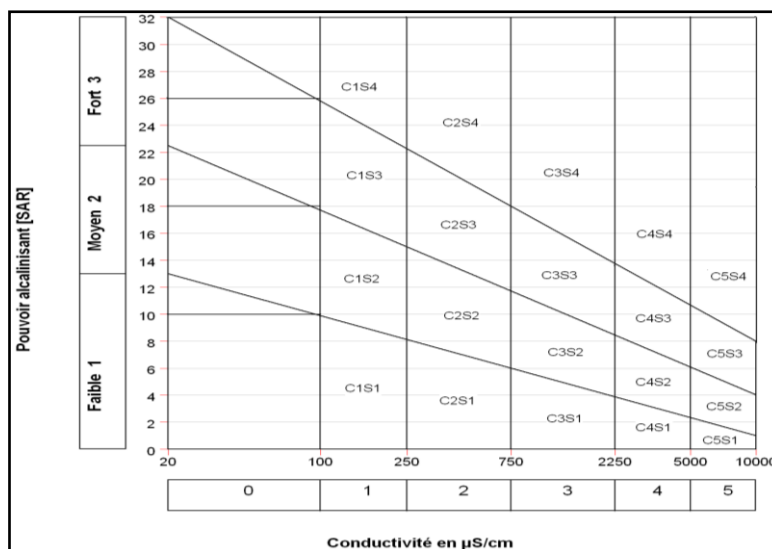


Figure 26: Diagramme de RIVERSIDE.

L'interprétation selon (Durand, 1982) des classes issues de cette projection est comme suite:

**Classe (C1S1) :** Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.

**Classes (C1S2 et C2S1):** Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles.

**Classes (C1S3, C2S2 et C3S1):** Eau de qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

**Classes (C1S4, C2S3, C3S2, C4S1):** Eau de qualité médiocre à mauvaise, a utilisé avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.

**Classes (C2S4, C4S2, C3S3):** Eau de qualité très mauvaise a utilisé que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.

**Classes (C3S4, C4S3):** Qualité très mauvaise a n'utilisé que dans des circonstances exceptionnelles.

**Classe (C4S4):** Eau déconseillée pour l'irrigation.

**IV-1-5 Le contrôle des résultats d'une analyse d'eau par la méthode du bilan ionique**

L'établissement de la balance ionique pour les résultats de l'analyse chimique d'une eau, permet de vérifier la fiabilité de cette dernière. Les éléments utilisés dans ce contrôle sont les quatre anions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$ ) et les quatre cations ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ); pour que la neutralité électrique de la solution soit respectée, la somme des cations doit être égale à celle des anions.

La précision d'une analyse ou le pourcentage d'erreur de la balance ionique est donnée par l'expression suivante :

$$E = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{(\sum r^+ + \sum r^-)} \times 100 \tag{30}$$

Avec: E : L'erreur ;  $r^+$  : Quantité en réaction des cations et  $r^-$  : Quantité en réaction des anions, elles sont données en milliéquivalent par litre et définie comme suit:

$$r = \frac{\text{Poids de l'élément en solution (mg)}}{\text{équivalent atomique } \frac{A}{N}} \tag{31}$$

Avec, **A** : La masse atomique; **N**: Valence.

**Selon Rodier J., 2005**, il existe toujours une certaine différence entre la somme des cations et celle des anions, or si l'erreur calculée est inférieure à **5%** on peut considérer l'analyse comme acceptable.

**IV-2 Caractérisation des eaux de barrage 'Sidi M'hamed Ben Aouda'**

**Introduction**

Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. En Algérie, l'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants liés à l'essor démographique et le développement accéléré des activités économiques, notamment l'agriculture en irrigué et l'industrie.

Le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, situé dans une région semi aride de l'Ouest, est destiné aussi bien pour l'alimentation en eau potable de la ville de Sidi Mohammed Ben Aouda que pour l'irrigation de la plaine de la Mina.

Le but recherché, dans ce chapitre, est de décrire et de quantifier l'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques, chimique et de pollution des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda.

Comme on la mentionné précédemment, le barrage est mis en service en 1978, mais le contrôle de la qualité de ses eaux n'a débuté qu'en 1985. De ce fait, la période sur laquelle notre étude s'étale est comprise entre 1985 et 2010. Les données pour la période allant de 1985 à 2000 ont été recueillies au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Oran et les données de la période qui vient après sont fournies par l'Agence Nationale de Ressources Hydriques d'Alger.

#### **IV-2-1 Prélèvement et méthodes d'analyse**

L'analyse d'une eau peut révéler la présence de gaz, matières minérales et organiques en suspension ou en solution. Ces composants peuvent être d'origine naturelle provenant des roches, du sol et de l'air auxquels s'ajoutent ceux résultants des activités humaines (urbanisation, industrie et agriculture) (**Rodier 1996**).

- **Les prélèvements**

S'il est bien évident qu'un prélèvement correct soit indispensable à l'obtention des résultats analytiques significatifs, il est tout aussi important de connaître le devenir de l'échantillon entre le prélèvement et son arrivée au laboratoire.

Les opérations, de prélèvements, de transport et des analyses au laboratoire, ont été assurées par le personnel de laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Oran, avec une fréquence d'une fois par mois.

Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en plastiques (polyéthylène), rincés trois fois avec de l'eau à analyser puis remplis jusqu'au bord. Les bouchons sont placés de telle façon qu'il n'y aucune bulle d'air pour éviter toute oxydation et dégazage. Pour la conservation et le transport de l'eau du barrage au laboratoire, les échantillons ont été conservés au frais à 4°C, dans une glacière et les analyses ont été effectuées le plus tôt possible en raison de l'évolution de certains ions. Les mesures de la température, de la teneur en oxygène, du pH et de la conductivité ont été faites sur place.

• Les méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse utilisées sont consignées dans le **tableau 34** suivant:

**Tableau 34: Les méthodes d'analyse physico-chimiques des eaux.**

Paramètres	Méthode
pH	Potentiométrique avec électrode de verre
La turbidité	Néphélométrie à la formazine
M E S	Filtration sur fibre de verre
Oxygène dissous dans l'eau	Potentiométrique
D C O	Par le dichromate de Potassium
D B O <sub>5</sub>	Respirometrique de Sierp
M Organique	Oxydabilité au permanganate de Potassium
Ammonium	Réaction de Berthelot
Nitrite	Diazotation à l'acide sulfurique
Nitrate	Dosage colorimétrique par hydrazine.
Phosphores	Dosage colorimétrique par molybdate d'ammonium.
Sulfates	Gravimétrique
Chlorures	Dosage colorimétrique par thiocyanate.
Calcium et Magnésium	spectrophotométrie d'absorption atomique avec flamme
Potassium et Sodium	spectrophotométrie d'émission de flamme
La conductivité électrique	le principe du pont de Wheatstone

Source (ANRH Oran, 2011)

**IV-2-2 Contrôle des résultats obtenus par la méthode du bilan ionique**

Pour vérifier la fiabilité des résultats obtenus, on a procédé au calcul de la balance ionique (**Formule 30**) pour chaque moyenne saisonnière sur la période étudiée. Le tableau suivant représente les résultats obtenus pour les saisons d'Automne et d'Hiver de l'année 2008.

**Tableau 35: Bilan ionique des eaux du barrage SMBA pour l'automne et l'hiver de l'année 2008.**

Saisons	cations	C en mg/l	fact de conv	C en (méq/l)	Σ r+ (méq/l)	anions	C en mg/l	fact de conv	C en méq/l	Σ r+ (méq/l)	E (%)
Automne	Ca <sup>++</sup>	92,00	0,049	4,51		Cl <sup>-</sup>	195,00	0,028	5,46		
	Mg <sup>++</sup>	37,33	0,082	3,06		SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	336,67	0,021	7,07		
	Na <sup>+</sup>	158,67	0,043	6,82		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	139,33	0,0163	2,27		
	k <sup>+</sup>	8,67	0,026	0,23	14,62	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,33	0,0161	0,10	14,90	0,97
Hiver	Ca <sup>++</sup>	78,67	0,049	3,85		Cl <sup>-</sup>	156,33	0,028	4,38		
	Mg <sup>++</sup>	45,00	0,082	3,69		SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	339,00	0,021	7,12		
	Na <sup>+</sup>	136,33	0,043	5,86		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	133,67	0,0163	2,18		
	k <sup>+</sup>	7,00	0,026	0,18	13,59	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,00	0,0161	0,16	13,84	0,90

Comme on vient de le constater, les pourcentages d'erreurs obtenus pour les saisons d'automne et d'hiver 2008 (**Tableau 35**) et pour le reste de la période d'étude sont inférieurs à **5 %**, et selon **Rodier (2005)**, on peut considérer l'analyse comme acceptable.

IV-2-3 Hydroclimatologie de la zone d'étude

IV-2-3-1 Variation de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI-3) et de l'indice d'aridité (I)

L'analyse de la **figure 27** révèle une très grande variabilité temporelle des précipitations que se soit pour les différentes saisons au sein de la même année ou bien d'une année à une autre. En général, les précipitations qui ont survenues dans la région pour la période (1985/1986-2010/2011) été majoritairement estivales à l'exception des années 2000 et 2009 dont les précipitations été respectivement automnales et hivernales et l'année 1996 qui peut être considérée comme une année exceptionnellement humide avec un SPI >1 pour les trois saisons (Hiver, printemps et été). En parallèle on constate d'une part que le nombre de saisons sèches été nettement supérieure à celui des saisons humides (16 contre 10) et d'autre part les sécheresses qui ont surgies dans la région sont loin d'être attribuées à une saison particulière mais en générale elles été printanières ou hivernales.

Pour ce qui de l'évolution de l'indice d'aridité annuelle de De Martonne, la **figure 27** révèle un indice supérieur à 10 pour les années 1996 et 1999 (années semi arides) et inférieur à 10 pour le reste des années (années arides).

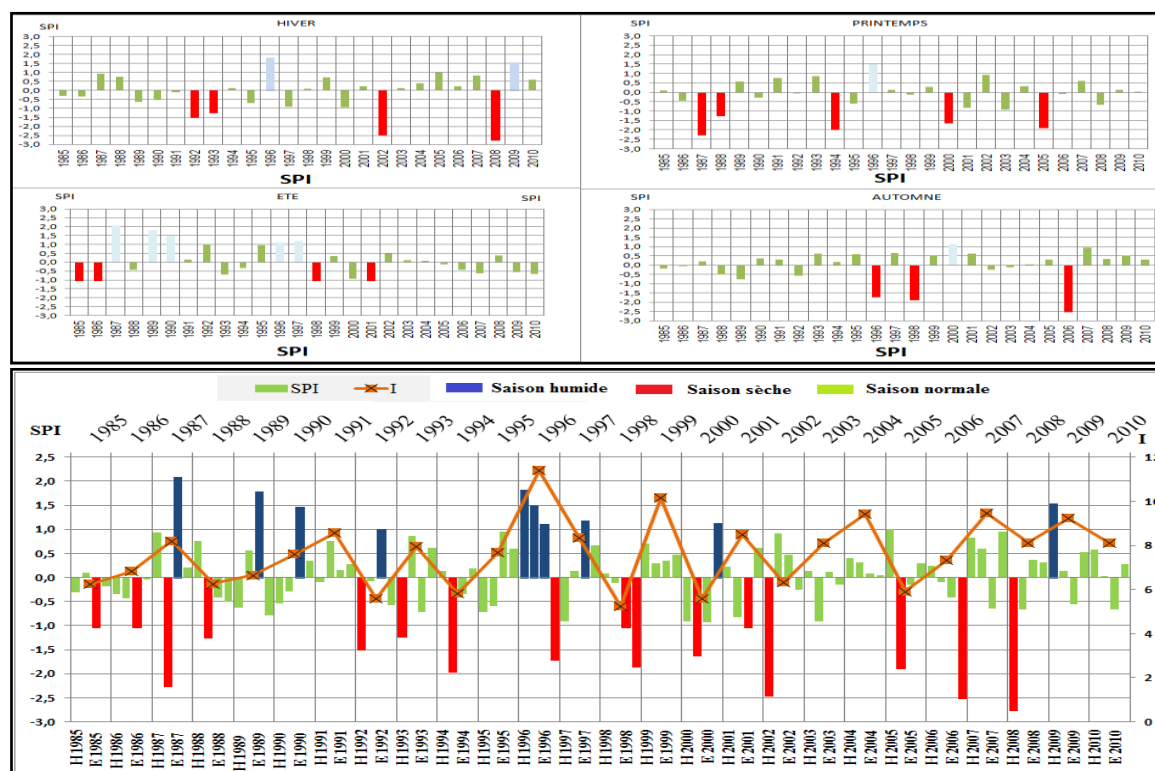


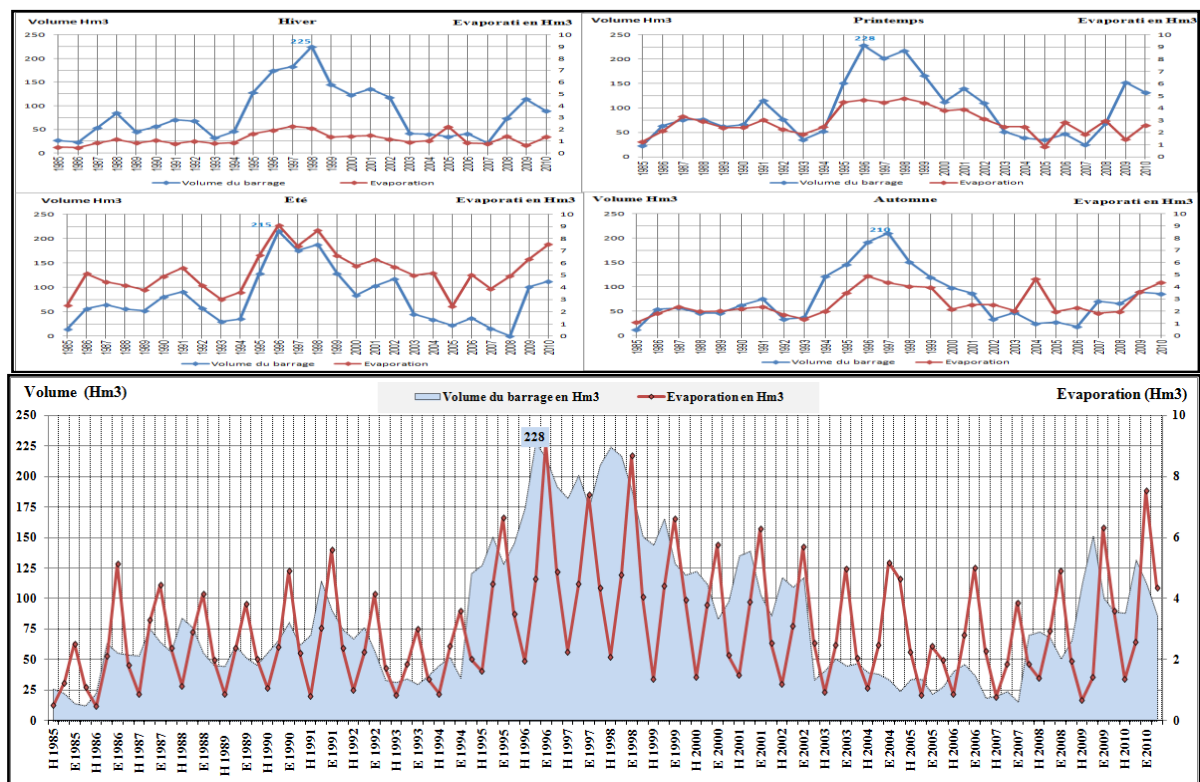
Figure 27: Evolution de l'Indice Standardisé des Précipitations ISP-3 pour les quatre saisons et l'indice d'aridité annuelle de De Martonne, pour la période 1985-2010.

IV-2-3-2 Evolution du volume de la retenue du barrage et de l'évaporation

Comme il a été mentionné dans le **paragraphe I-4**, la mise en service du barrage été en 1978, mais vu le déficit des précipitations (décennie 1980 déficitaire) le volume du barrage à connu des fluctuations importantes d'une saison à une autre et d'une année à une autre mais en restant toujours à une capacité inférieure à **50 %** de sa capacité maximale (**235 Hm<sup>3</sup>**).

L'analyse de la **figure 28** montre que le barrage a atteint le volume de **228 Hm<sup>3</sup>** pour la première fois au printemps **1996**, ce dernier coïncide avec les précipitations hivernales (DJF), printanières(MAM) et estivales (JJA) importantes caractérisées respectivement par un (SPI-3 de **+1,89**, **+1,5** et **+1,11**), après cette année, le volume du barrage s'est stabilisé pour les deux années suivantes mais il a connue une diminution importante entre les années **2003** et **2008**, cette diminution peut être expliquée par le déficit des précipitations marqué par un SPI-3 négatif pour différentes saisons à signaler l'hiver 2002 (SPI de **-2,45**), le printemps 2005 (SPI de **-1,88**) et l'hiver 2008 (SPI de **-2,76**). Le barrage à atteint le volume de 150 Hm<sup>3</sup> en 2009, suite aux précipitations hivernales importantes (SPI de **+1,5**).

La courbe d'évolution de l'évaporation est calquée sur la courbe du volume, avec une variabilité saisonnière bien distincte, or les valeurs les plus importantes sont enregistrées pendant la saison estivale et les plus faibles pendant la saison hivernale.



**Figure 28: Variations saisonnières du volume de la retenue du barrage SMBA et de l'évaporation sur la période 1985/2010.**

**IV-2-4 Interprétation des résultats d'analyse de la qualité des eaux du barrage SMBA****IV-2-4-1 Qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA**

Après avoir calculé les moyennes saisonnières de chaque paramètre pour chaque année et en se référant à la grille de la qualité des eaux de surface adoptée par l'ANRH, on a pu dresser la fiche de la qualité des eaux du barrage SMBA pour la période allant de 1985 à 2010.

En analysant cette fiche de qualité (**Figure 29**) on peut dire que la qualité des eaux du barrage étudié varie, d'une année à une autre et elle est également variable au sein de la même année d'une saison à une autre.

Les causes éventuelles d'une telle variabilité peuvent être attribuées à diverses origines, à savoir, la nature géologique des terrains traversés, la nature pédologique du sol, les rejets d'eaux usées des populations riveraines et également les facteurs climatiques qui peuvent augmenter la vulnérabilité du bassin versant vis-à-vis les phénomènes d'érosion.

Dans ce qui vient, et dans le but de cerner pour chaque paramètre les facteurs qui régissent son évolution, on va tenter d'interpréter la variabilité temporelle de la qualité physico-chimique, minérale, organique et azotée pour chaque saison sur la période d'étude.

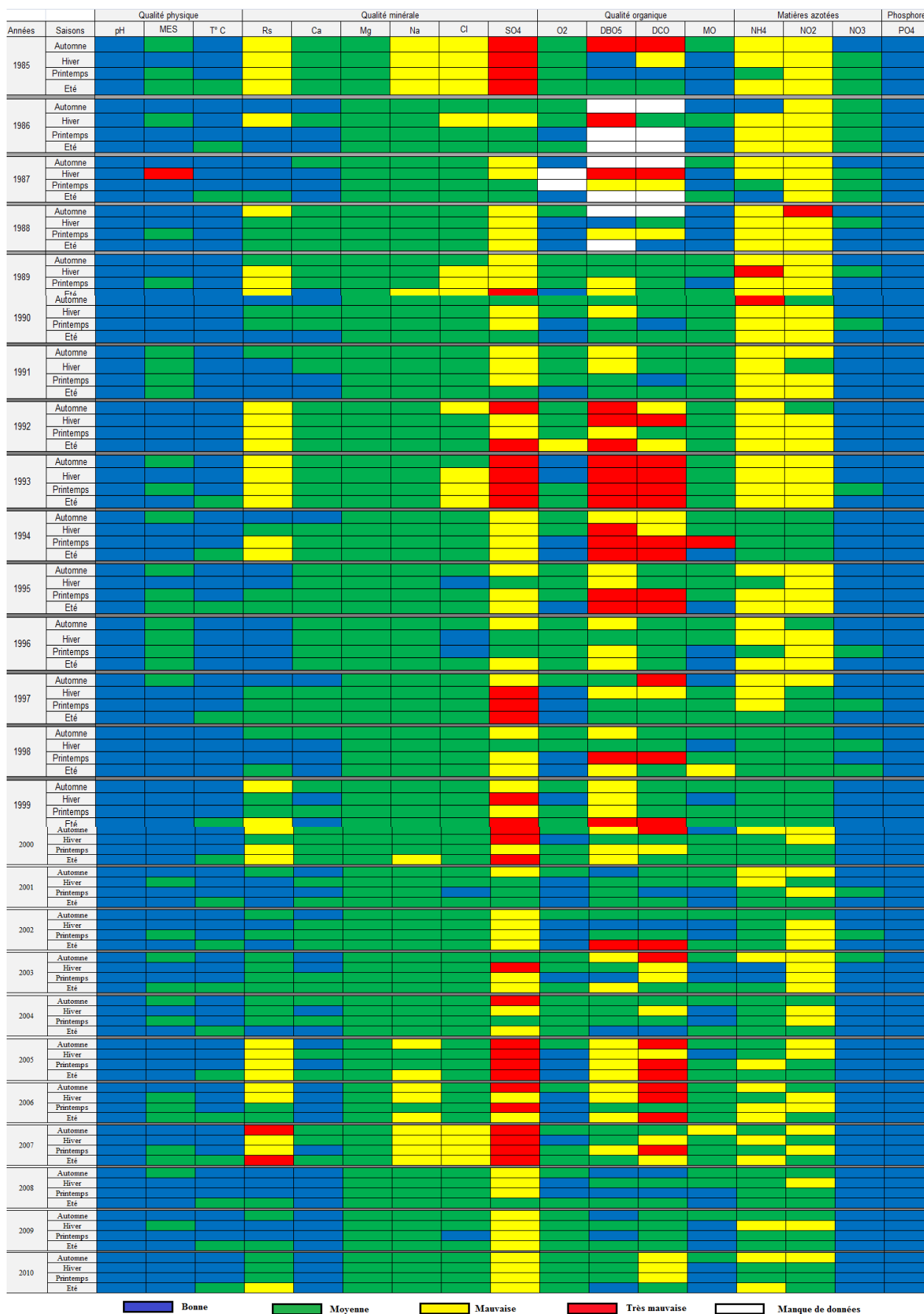


Figure 29: Fiche de la qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA pour la période (1985-2010)



## IV-2-4-2 Qualité Physico-chimiques des eaux du barrage

Il s'agit des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de l'état chimique des autres éléments dans l'eau.

Le tableau suivant résume les paramètres statistiques (Maximum, Minimum, Moyenne et l'écart type des paramètres (pH, MES et Température) de l'eau du barrage SMBA pour chaque saison sur la période d'étude.

**Tableau 36: Variation des paramètres physico-chimiques des eaux du barrage SMBA.**

Saisons	Paramètres statistiques	pH	MES	T en °C
Hiver	Max	8,5	113	14,2
	Moy	8,1	25	12,5
	Min	7,5	6	10,0
	Ecart type	0,3	21	1,1
Printemps	Max	8,6	67	20,3
	Moy	8,1	30	17,5
	Min	7,6	1	12,3
	Ecart type	0,3	17	1,9
Été	Max	8,7	52	28,5
	Moy	8,2	22	25,3
	Min	7,5	0	16,6
	Ecart type	0,3	14	2,4
Automne	Max	8,5	62	24,7
	Moy	8,0	31	21,4
	Min	7,5	4	17,3
	Ecart type	0,3	14	1,7

- **La température:**

Il est important de connaître la température de l'eau car elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique et sur la détermination du pH (**Rodier, 1984**).

Les températures de l'eau relevées dans le barrage sont comprises entre **10 et 28,5 °C**. Selon la fiche de qualité (**Figure 29**), l'eau du barrage peut être classée comme bonne à moyenne.

Les eaux de la retenue du barrage montrent une variation assez marquée des températures d'une saison à une autre causé par leur contact direct avec l'atmosphère. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant l'été et les plus faibles pendant l'hiver.

- **Le potentiel Hydrogène (pH)**

Les valeurs de pH des eaux du barrage sont relativement neutres à légèrement alcalines, les moyennes saisonnières fluctuent entre **7,5 et 8,7** avec une très faible variation que se soit au sein de la même saison ou bien d'une saison à une autre. Selon la grille de la

qualité des eaux de surface, les eaux du barrage sont de bonne qualité vis-à-vis le potentiel Hydrogène.

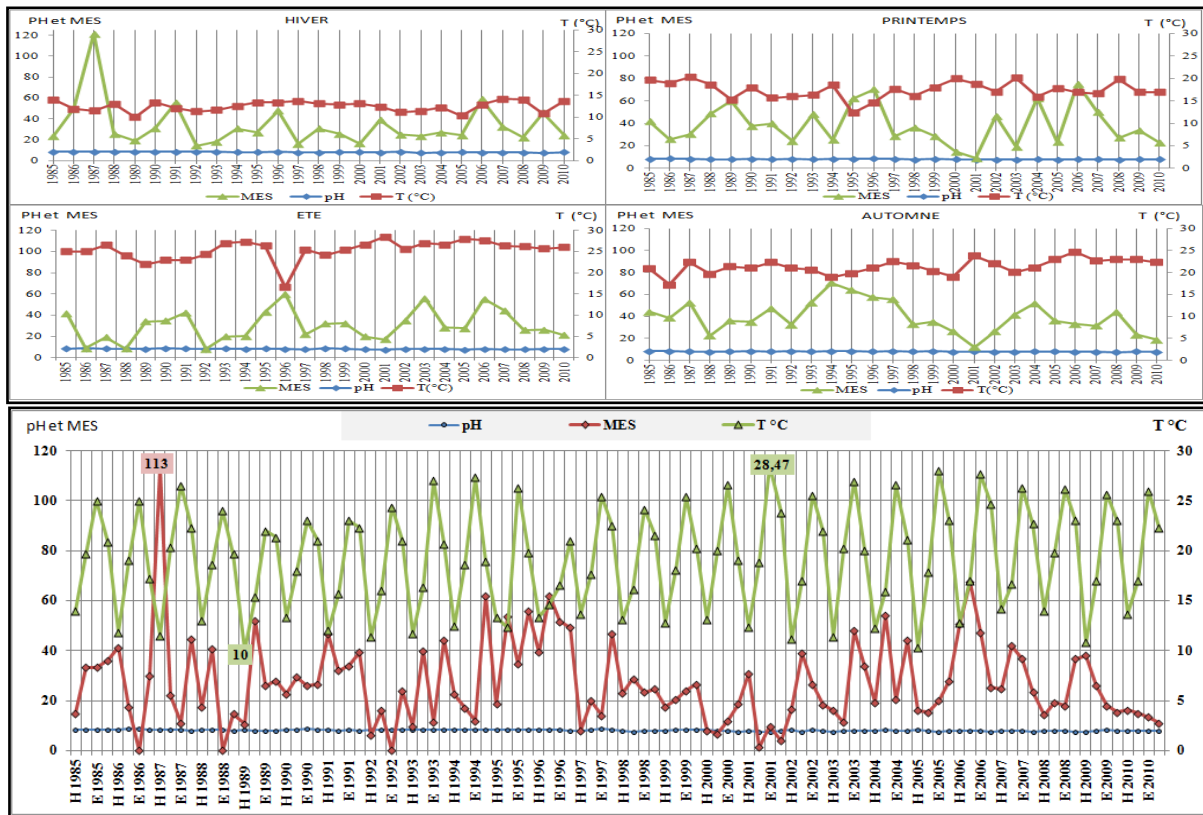


Figure 30: Variation saisonnière des paramètres physico-chimiques sur la période 1985/2010.

- Les matières en suspension (MES)

Les valeurs de matières en suspensions obtenues varient entre **0** et **113 mg/l**. A l'exception de la valeur enregistrée l'hiver **1987** l'ensemble des résultats qualifient les eaux du barrage de bonne et moyenne qualité (**Figure 29**).

L'analyse de **la figure 30** et du **tableau 36** montre une très grande variation dans les valeurs mesurées des matières en suspensions d'une saison à une autre, et au sein de la même saison d'une année à une autre. Le pic des MES est survenu pendant l'hiver 1987 avec une valeur de (**113mg/l**), cette valeur élevée peut être attribuée à une sécheresse printanière intense (**SPI= -2,26**) qui a causé la vulnérabilité du bassin versant à l'érosion suivie d'une précipitation estivale importante (**SPI= 2,08**).

**Remarque:** la cuvette du barrage joue un rôle très important dans la décantation des matières en suspensions, de ce fait, les valeurs faibles en ce paramètre peuvent être attribuées au phénomène de la décantation.

## IV-2-4-3 L'évolution des éléments chimiques

Une analyse complète des éléments majeurs a été effectuée sur les eaux prélevées dans le barrage du SMBA pendant la période allant de 1985 à 2010. Les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types saisonniers de ces ions et de la conductivité électrique des eaux sont présentées dans le **tableau 37**.

D'une manière générale, on peut constater que les valeurs des paramètres considérés sont très variables; les teneurs les plus élevées, pour la plupart des éléments, sont observées pendant la saison d'été, à cause de la faiblesse des précipitations et de l'évaporation élevée. En revanche, les concentrations les plus faibles sont loin d'être attribuées à une saison particulière.

**Tableau 37: Variation des paramètres de la minéralisation globale des eaux du barrage SMBA**

Saisons		CE	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Hiver	Max	2050,00	131,00	85,00	248,33	12,00	354,00	484,67	219,00
	Moy	1436,31	104,44	57,41	154,13	8,65	225,29	355,98	158,76
	Min	1056,33	74,00	33,33	103,00	5,67	144,83	278,50	133,67
	Ecart type	274,17	14,85	14,36	37,48	1,86	61,98	57,46	16,00
Printemps	Max	2227,00	134,00	84,00	255,33	13,67	410,00	519,00	180,67
	Moy	1484,71	104,70	54,23	157,29	8,63	229,64	357,92	148,87
	Min	1115,33	72,67	31,67	107,33	5,33	138,33	228,00	117,00
	Ecart type	309,89	13,99	13,29	38,94	1,98	69,09	68,68	15,96
Eté	Max	2533,33	148,00	93,67	302,67	13,67	445,67	554,00	205,33
	Moy	1530,03	98,94	59,15	167,99	9,35	239,05	383,07	137,97
	Min	1100,00	66,67	34,33	107,67	5,00	159,11	270,67	89,67
	Ecart type	340,41	17,81	12,95	48,90	1,82	67,22	84,28	24,60
Automne	Max	2233,33	137,33	91,33	277,67	15,67	372,00	540,00	188,67
	Moy	1498,29	101,83	59,22	163,73	9,65	237,26	376,23	148,51
	Min	1153,33	80,33	37,33	108,00	6,33	163,33	278,00	115,33
	Ecart type	273,13	13,94	12,85	42,35	2,06	56,33	69,11	15,97

La variation saisonnière interannuelle des paramètres considérés est représentée dans la **figure 32**.

- **La conductivité électrique (CE):** Elle est liée à la présence des espèces ioniques en solution et donc elle constitue un critère d'appréciation de la minéralisation globale d'une eau (**Degrement, 1978**). Elle dépend de la température et de la nature des terrains traversés.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la conductivité électrique mesurées pour la saison d'hiver sont comprises dans la fourchette de **2050 µs/cm** à **1056 µs/cm**, pour le printemps elle fluctue entre **2227** et **1115 µs/cm**, pendant la saison estivale le maximum était de **2533 µs/cm** et le minimum de **110 µs/cm** et pour l'automne la conductivité maximale était de **2235 µs/cm** et minimale de **1153 µs/cm**.

On constate également, que les valeurs de la conductivité les plus élevées sont enregistrées pendant l'année **1985** pour les saisons d'hiver, été et automne. Pour la saison de printemps le pic est enregistré pendant l'année **1993**. Ces valeurs élevées peuvent être liées au volume faible du barrage dû essentiellement aux faibles précipitations et à l'évaporation élevée (**Figure 28 et 29**). Pour ce qui est des minimales pour les quatre saisons: hiver, printemps, été et automne, les années d'apparition sont respectivement **2009, 2009, 1990 et 1994**. Cette diminution dans les valeurs de la conductivité peut être liée au phénomène de dilution causé par l'élévation du volume du barrage (**Figure 28**) suite aux précipitations qui ont survenues dans la région et indiquées par un Indice Standardisé de Précipitations positif (**Figure 27**).

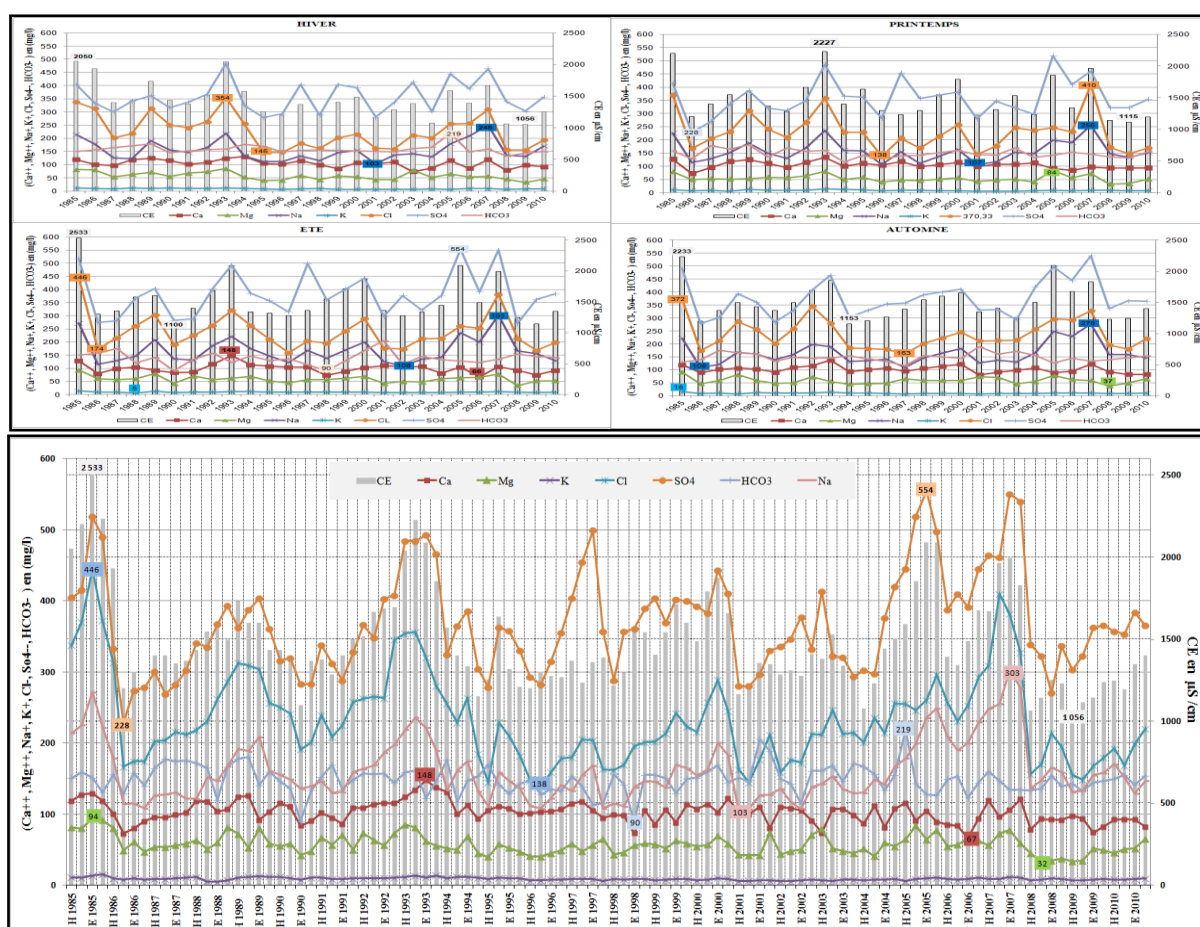


Figure 31: Evolution saisonnière de la conductivité électrique et des éléments chimiques sur la période 1985/2010.

- Le calcium (Ca<sup>++</sup>)

La présence des ions Ca<sup>++</sup> dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles: Soit la dissolution des formations carbonatées et dolomitiques (CaCO<sub>3</sub>, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO<sub>4</sub>) (Debieche, 2002).

Les concentrations en calcium varient entre un maximum de **148mg/l** et un minimum de **66 mg/l** enregistrés respectivement pour la saison d'été de l'année **1993** et **2006**.

- **Le Magnésium ( $Mg^{++}$ )**

Ses origines sont comparables à celles du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite ( $MgCO_3$ ) et dolomite ( $CaMg(CO_3)_2$ )).

Les concentrations en magnésium varient entre **84mg/l** enregistrée le printemps de l'année **2005** et **37 mg/l** enregistrée l'automne de l'année **2008**.

L'ensemble des valeurs mesurées du Calcium et Magnésium permettent de classer l'eau du barrage dans les classes de bonne et moyenne qualité.

- **Le Sodium ( $Na^+$ )**

Il tient son origine des échanges de base qui s'effectuent au niveau de certains minéraux (argiles sodiques). C'est un élément constant dans l'eau, il provient géologiquement de la lixiviation du dépôt en surface et en sous sol des sels tel que les chlorures de sodium et de la décomposition des silicates alumino-sodiques. Il peut avoir aussi une origine industrielle (**Rodier, 2005**).

D'une manière générale, l'analyse de la **figure 29**, représentant la fiche de la qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA, montre une dégradation vis-à-vis ce paramètre pendant les années:

-**1985**, pour les quatre saisons;

-**1989 et 2000**, pour la saison estivale;

-**2005**, pour les saisons d'automne et d'été;

-**2006**, pour les saisons d'automne, hiver et été;

-**2007**, pour les quatre saisons.

En revanche, l'analyse de **la figure 31** montre une grande variabilité dans les concentrations en Sodium d'une saison à une autre et d'une année à une autre; les valeurs maximales pour les quatre saisons (hiver, été, printemps et automne) sont respectivement de **248, 255, 302 et 277 mg/l** et sont enregistrées en **2007** et les concentrations les plus faibles sont de **103, 107, 107 et 108 mg/l** relevée en **2001** pour les trois premières saisons et en **1986** pour l'automne.

- **Le potassium ( $K^+$ ):**

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). Selon **Rodier (1984)**, la présence de cet élément, à peu près constante dans les eaux naturelles, ne dépasse pas habituellement 10 mg/l à 15 mg/l et n'offre pas d'inconvénients pour la santé des populations.

En analysant **la figure 32** on constate que les concentrations en potassium participent très peu à la minéralisation des eaux, elles varient entre **16 mg/l (automne 1985)** et **5 mg/l (été 1988)**.

- **Les Chlorures (Cl<sup>-</sup>) :**

Lorsque les eaux traversent des terrains salifères-argileux ou marneux, leur composition s'enrichit en chlorures. L'utilisation des pesticides organochlorés et le déversement de détergents dans la rivière influent également les teneurs en chlorure des eaux courantes (**Rodier, 1984**).

L'analyse de la fiche de la qualité saisonnière des eaux du barrage SMBA (**Figure 29**) révèle une augmentation des concentrations en chlorure dans certaines années ce qui a conféré à l'eau une mauvaise qualité vis-à-vis cet élément. Les années concernées par cette dégradation sont:

- 1985** dans toutes les saisons
- 1986** en hiver;
- 1989** en hiver, printemps et été.
- 1992** en automne;
- 1993** en Hiver, printemps et automne;
- 2007** pour l'ensemble des saisons.

L'analyse de **la figure 32** montre que, les concentrations en ion chlorure varient entre un minimum de **159 mg/l** enregistré en été **1996** et un maximum de **445 mg/l** enregistré dans la même saison pour l'année **1985**.

- **Les Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) :**

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des sulfates à des concentrations variables. Selon **Mabilot (1979)**, les sulfates proviennent de la dissolution de gypse et de l'oxydation des sulfures dans les roches. Ils sont présents aussi au niveau des matières organiques d'origine animale.

Les concentrations en sulfate mesurées dans les eaux du barrage sont pratiquement très élevées sur toute la période d'étude et permettent de classer ces eaux dans les classes de mauvaise et très mauvaise qualité (**Figure 29**).

Les teneurs en sulfates marquent une très grande variation d'une saison à une autre, et pour la même saison d'une année à une autre. La concentration la plus élevée est de **554mg/l** enregistrée pour les saisons d'été de l'année **2004** et la plus faible est de **228 mg/l** enregistrée le printemps de l'année **1986**.

- **Les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique.

Les concentrations en cet élément dans les eaux du barrage varient entre un maximum de **219 mg/l** enregistré en hiver **2005** et un minimum de **90 mg/l** enregistré en été **1998**.

#### IV-2-4-4 Faciès chimiques

##### ☒ Comparaison ionique

La classification des eaux d'après Stabler consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale, en utilisant la formule dite caractéristique définie par Stabler comme suite:

$$r(\%) = \frac{r}{[C]} \times 100 \quad (32)$$

Où  $[C] = \sum r^+$  pour les cations ou  $\sum r^-$  pour les anions.

$r$  : quantité en réaction de l'élément considéré en mEq/l;

$r\%$  : quantité en réaction en pourcent;

##### ☒ Formule ionique

La formule ionique d'une eau permet, d'une part, de mettre en évidence la teneur relative des différents éléments et d'autre part, de classer les eaux dans les différentes catégories. Ces formules ioniques sont obtenues en plaçant de gauche à droite et par ordre décroissant les quantités en réaction (en %) des anions, ensuite, celles des cations.

Les formules ioniques obtenues sur la période d'étude sont données dans **le tableau IV en annexes**.

L'examen **du tableau 38**, montre que les eaux du barrage SMBA sont des eaux chlorurées et sulfatées. Ces familles représentent respectivement **82 %** et **18 %** des résultats. La prédominance de ces deux familles est due probablement à la nature géologique des terrains traversés (présence des évaporites qui sont riches en chlorures et en sulfates), ainsi qu'aux rejets d'eau usée non traités contenant souvent des détergents riche en ces éléments.

**Tableau 38: Le pourcentage de chaque faciès chimique sur la période 1985/2010**

Famille des eaux	Faciès chimique	Pourcentage	
Sulfatée	Sulfaté sodique	71	82
	Sulfaté calcique	8	
	Sulfaté magnésien	3	
Chlorurée	Chloruré sodique	16	18
	Chloruré calcique	1	
	Chloruré magnésien	1	

☒ La représentation sur le diagramme de Piper

La représentation des analyses chimiques sur les diagrammes triangulaire de piper permet d'avoir une approche du faciès chimique des eaux. Le principe consiste à reporter dans chaque triangle réservé à cet effet les r % de chaque ion (r % rapport caractéristique). Dans chaque triangle nous obtiendrons un point triple soulignant la dominance ou non dominance d'un cation ou d'un anion donné, ces deux points triples nous donnent un point unique dans le losange qui représente le faciès chimique de l'échantillon considéré.

L'analyse de la composition en ions majeurs et leur distribution dans le diagramme de piper (Figure 32) montre que le faciès chimique dominant pour l'eau du barrage est le chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

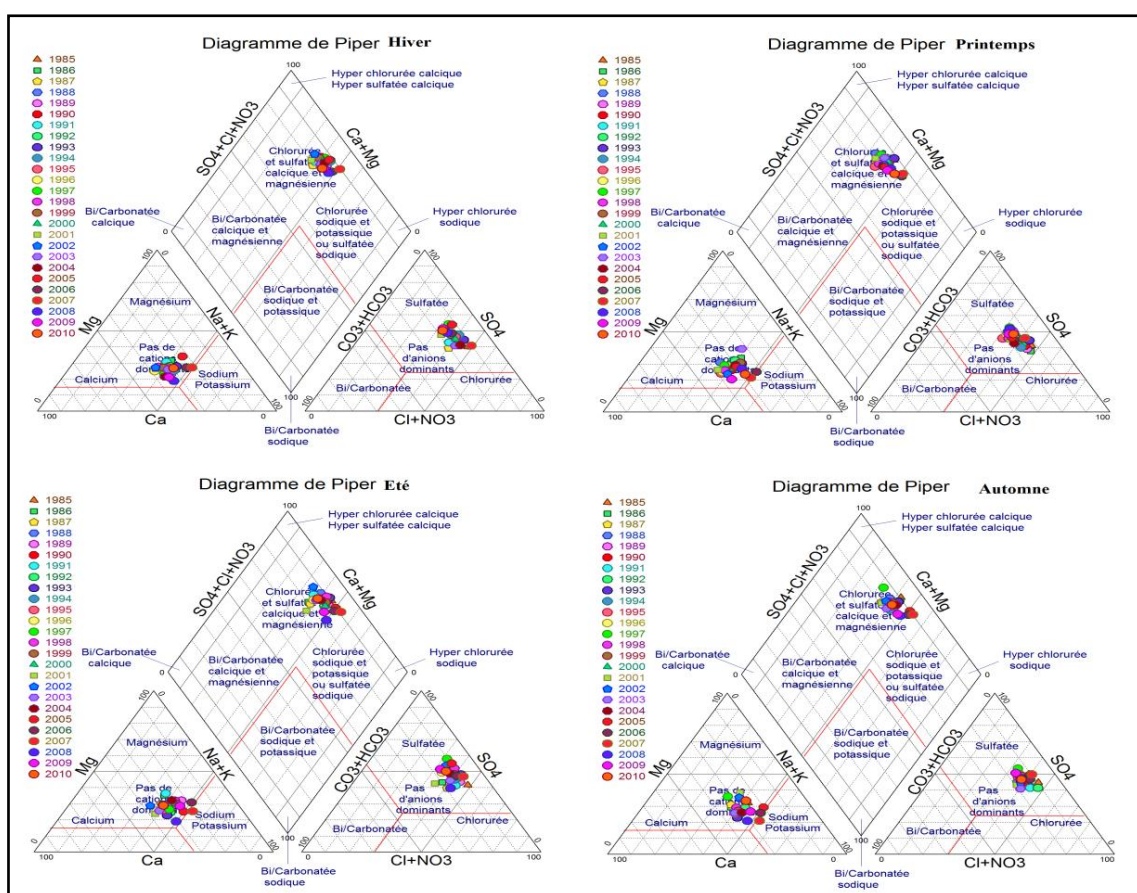


Figure 32: Faciès chimiques de l'eau d'après le diagramme de Piper.

IV-2-4-5 Origine de la minéralisation des eaux

Les résultats d'analyses chimiques des eaux du barrage montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique qui fluctuent entre 2227 et 1056  $\mu\text{s/cm}$  à l'exception d'une valeur extrême enregistrée pendant l'été de l'année 1985 et qui a atteint les 2533 $\mu\text{s/cm}$ . De ce fait, et selon la classification donnée dans le tableau 33 on peut dire que l'eau du barrage appartient à la classe C3: eau à forte salinité. En parallèle les élément chimiques  $\text{SO}_4^{2-}$  (554mg/l-228



mg/l), Cl<sup>-</sup> (445 mg/l-159 mg/l), Na<sup>+</sup> (302 mg/l-103mg/l) ont des concentrations nettement plus élevées à comparer aux éléments, Ca<sup>++</sup> (148mg/l-66mg/l), Mg<sup>++</sup> (84mg/l -37 mg/l) et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(219 mg/l -90 mg/l). L'analyse globale de la figure 31 montre également que l'évolution des éléments (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) est parallèle à celle de la conductivité électrique.

L'origine des sulfates, Chlorures, et sodium peut être liée d'une part à la dissolution et le lessivage des formations évaporitiques (gypse et anhydrite, halite) provenant de Miocène supérieur largement répandu dans la partie nord du bassin versant de la Mina et les formations superficielles riches en argile et en marnes à gypse et d'autre part elle peut être attribuée aux rejets d'eau usée non traitées. La présence du calcium, magnésium et bicarbonate peut être liée à la dissolution des formations carbonatées et dolomitiques.

Deux faciès chimiques dominants ont été observés, le faciès sulfaté sodique et le faciès chloruré sodique. On constate en revanche, l'apparition dans certaines saisons des faciès sulfatés calciques et magnésiens.

Dans ce qui suit on va tenter d'une part de déterminer l'origine de ces éléments chimiques dominants et d'autre part d'examiner la tendance des formes chimiques dans le système d'équilibre thermodynamique entre la phase dissoute et la phase minérale.

#### **IV-2-4-5-1 Corrélation entre les ions**

On peut donner une idée sur l'origine des éléments chimiques à partir de la bonne corrélation qui existe entre eux. On va tenter d'examiner deux relations principales:

- **La corrélation entre les cations (Na<sup>++</sup>+Mg<sup>++</sup>+K<sup>+</sup>) et l'anion Cl<sup>-</sup>**

La figure 33 indique une corrélation linéaire positive entre les cations ((Na<sup>+</sup>+Mg<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>) et l'anion chlorure avec un coefficient de détermination élevé ( $R^2 > 0,8$ ). La pente de la droite de corrélation est très proche de 1 mais l'ordonnée à l'origine est positive: Cela tend à prouver que la majeure partie des chlorures provient de la dissolution des chlorures de Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup> provenant de la dissolution des formations évaporitiques traversées, mais qu'une très faible proportion de ces cations pourrait provenir de la dissolution d'autres minéraux.

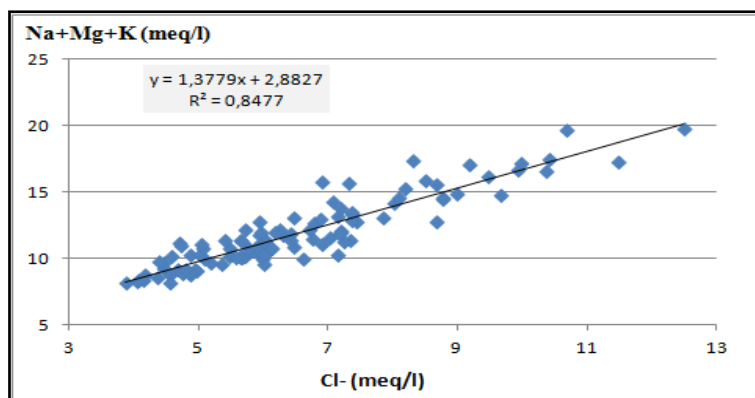


Figure 33: Variation de  $(Na^{+}+Mg^{+}+K^{+})$  en fonction de  $Cl^{-}$ .

- La corrélation entre les éléments  $(Ca^{++}+Mg^{++})$  et  $(HCO_3^{-}+SO_4^{--})$

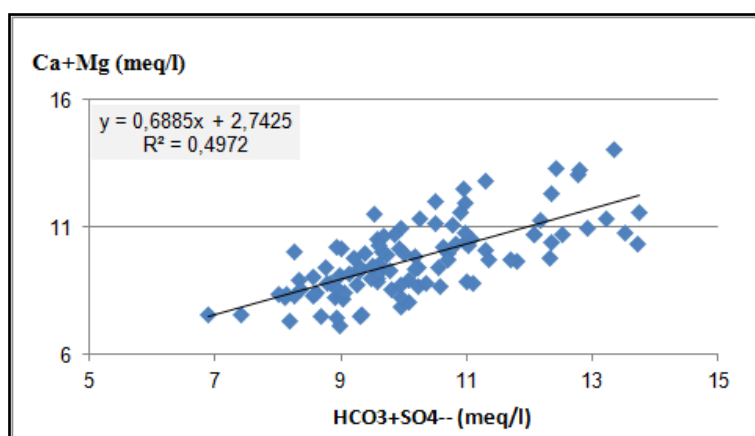


Figure 34: Variation de  $(Ca^{++} + Mg^{++})$  en fonction de  $(HCO_3^{-} + SO_4^{--})$ .

La figure 34 rapportant la variation de  $(Ca^{++} + Mg^{++})$  en fonction de  $(HCO_3^{-} + SO_4^{--})$  indique qu'une partie de calcium et magnésium pourrait bien provenir de la dissolution des carbonates et des dolomites du jurassique et de crétacé traversés.

#### IV-2-4-5-2 Evolution des minéraux et des éléments dissous

L'Indice de saturation  $Is$ , donné par la formule (33) suivante est souvent utilisé pour expliquer l'équilibre des eaux avec la matrice. L'eau est en équilibre avec un minérale lorsque  $Is=0$ , elle est sous-saturée lorsque  $Is<0$  et sursaturée lorsque cet indice est supérieur à 0. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, celui-ci aura tendance à se dissoudre (Debieche, 2002).

$$Is = \log \left( \frac{PAI}{K_s} \right) \tag{33}$$

Avec:  $PAI$ : le Produit d'Activité des Ions et  $K_s$ : le produit de solubilité du minéral considéré.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau est mené en utilisant le logiciel Diagramme. Les valeurs trouvées pour chaque saison, sur la période **1985-2010**, et pour les minéraux : dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), halite ( $\text{NaCl}$ ) et le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) sont consignées dans le **tableau VI en annexes**.

Les résultats ainsi obtenus indiquent une sous-saturation par rapport au gypse et la halite et une sursaturation par rapport à la calcite et à la dolomite sur toute la période d'étude.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation. Cela est expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques ( $\text{NaCl}$  (-1,58);  $\text{CaSO}_4$  (-4,85)), ce qui permet aux éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^-$  de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible (Dolomite (-17,09, Calcite (-8,48)), ce qui produit une précipitation rapide de ces éléments chimiques.

#### IV-2-4-6 Evolution des paramètres organiques et de l'oxygène dissous

Le tableau suivant donne le maximum, moyenne, minimum et l'écart type des paramètres organiques ( $\text{DBO}_5$ , DCO et de la Matière organique) et de l'oxygène dissous mesurés des eaux de barrage SMBA.

**Tableau 39: Variation des paramètres organiques et de l'oxygène dissous des eaux du barrage SMBA.**

Saisons	Paramètres statistiques	O <sub>2</sub> en %	DBO <sub>5</sub>	DCO	MO
Hiver	Max	106,13	34,00	96,67	9,93
	Moy	86,30	11,68	39,34	5,22
	Min	76,23	2,60	13,33	3,00
	Ecart type	7,23	7,21	17,65	1,32
Printemps	Max	127,75	40,00	115,00	18,00
	Moy	90,49	11,94	41,15	5,50
	Min	71,53	2,00	10,00	3,03
	Ecart type	11,28	9,41	23,86	2,79
Eté	Max	124,23	30,33	70,00	11,00
	Moy	93,04	12,14	39,07	5,69
	Min	40,05	4,63	18,00	2,63
	Ecart type	16,04	6,62	15,90	1,80
Automne	Max	98,37	43,33	113,33	10,67
	Moy	77,67	12,13	44,13	6,34
	Min	49,70	4,23	19,67	3,80
	Ecart type	10,06	8,26	23,11	1,37

- **Oxygène dissous:**

Dans les milieux aquatiques, l'oxygène est le moteur essentiel de la vie des organismes, il assure l'oxydation de la matière organique en faisant intervenir les différents groupements bactériens et en contribuant ainsi à l'autoépuration du milieu. L'oxygène est

généralisé souvent par les algues et les végétaux aquatiques dont l'activité photosynthétique assure l'approvisionnement des organismes aquatiques en oxygène nécessaire à leur respiration, il est apporté également au milieu par aération à partir de l'atmosphère ou par diffusion à partir d'eaux plus oxygénées. L'oxygène dissous est étroitement lié à la température qui conditionne sa solubilité.

Les teneurs en oxygène dissous, dans les eaux du barrage SMBA, varient entre **127 %** et **40 %**, la majeure partie des enregistrements sont supérieures à **50 %** ce qui permet de classer l'eau du barrage dans les classes de bonne et moyenne qualité (**Figure 29**).

L'analyse de **la figure 36** montre que l'évolution de l'oxygène dissous est très peu affectée par le rythme saisonnier

Pour la saison estivale la saturation de l'eau en oxygène est majoritairement très élevée et elle dépasse dans plusieurs cas le **100 %**, cela peut être expliqué par un développement accéléré de l'activité photosynthétique dû aux bonnes conditions d'insolation et des concentrations élevées en nutriments.

Pour les saisons hivernales et printanières les concentrations fluctuent entre **128 %** et **71 %** ces niveaux d'oxygénation relativement hauts sont assurés d'une part, par l'action combinée de l'aération par le vent et des apports pluviaux, d'autre part, par le développement de l'activité photosynthétique printanière. Les concentrations automnales sont les plus basses comparées à celles enregistrées pendant les autres saisons cela peut être expliqué par l'abondance de la matière organique consommatrice d'oxygène, charriée par les premières pluies, et également par les températures relativement élevées.

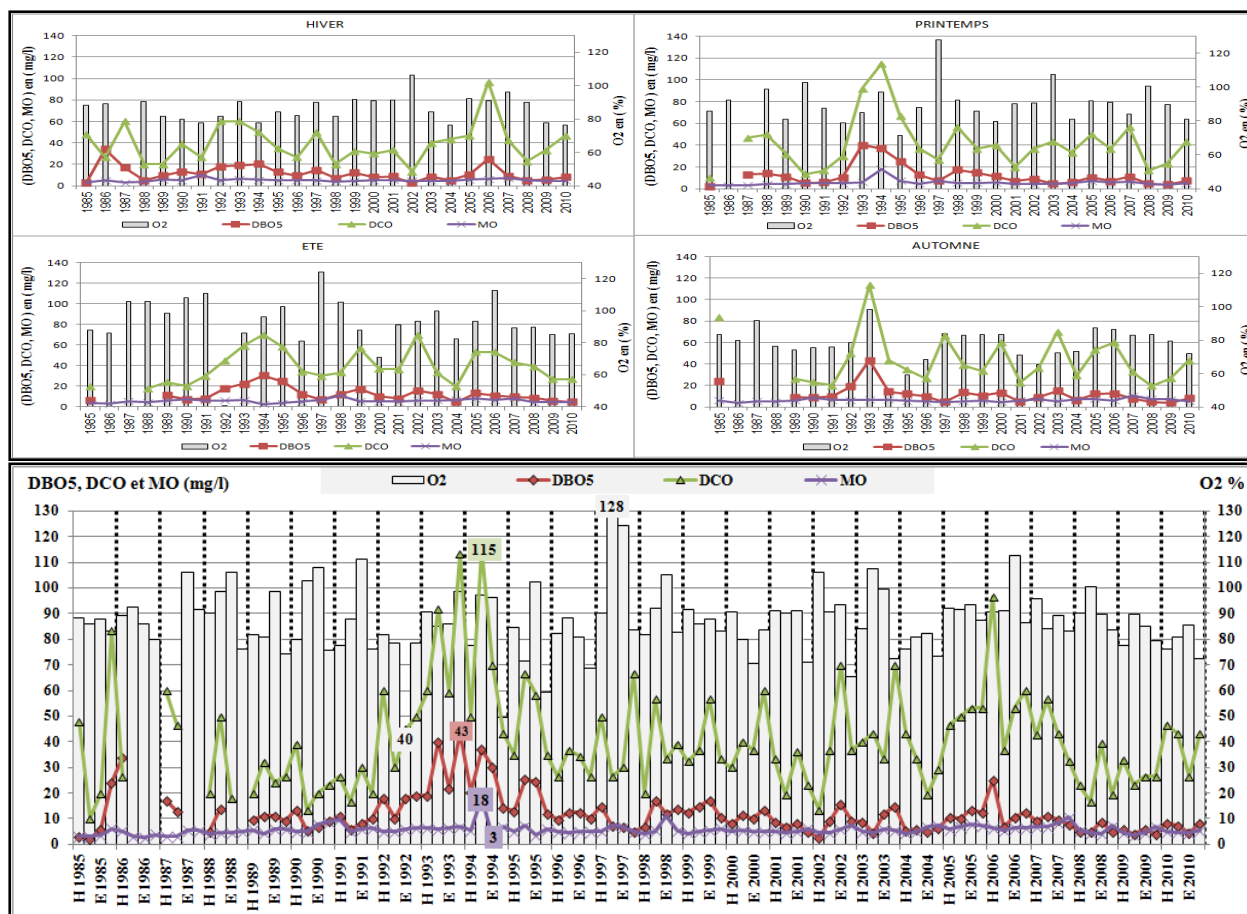


Figure 35: Evolution saisonnière des paramètres organiques et de la saturation de l'eau sur la période 1985/2010.

- **La matière organique (MO):**

Les concentrations relevées en Matières organiques dans les eaux du barrage varient entre un maximum de **18 mg/l** enregistré pour le printemps **1994** et un minimum de **2,67 mg/l** enregistré en été pour la même année. L'ensemble des valeurs permettent de classer les eaux du barrage dans les classes de bonne et moyenne qualité à l'exception de la valeur maximale de **18mg/l** qui confère à l'eau une qualité très mauvaise.

- **La Demande Biochimique en Oxygène (DBO<sub>5</sub>)**

La demande biochimique, **DBO**, indique la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau, par l'intermédiaire des organismes qui se développent, dans des conditions données dans le milieu. Elle est évaluée au cinquième jour à 20°C, désignée **DBO<sub>5</sub> (Pesson, 1980)**.

La mesure de la **DBO<sub>5</sub>** permet indirectement d'évaluer le contenu d'une eau en matières organiques biodégradables et donc son degré de pollution.

Les concentrations en **DBO<sub>5</sub>** mesurées dans l'eau du barrage fluctuent entre un maximum de **43 mg/l** enregistré en saison d'automne et un minimum de **2 mg/l** relevé pendant la saison hivernale. D'après la fiche de qualité des eaux du barrage SMBA **figure 29**, on peut

dire que plus de **50 %** des valeurs mesurées de ce paramètre place l'eau de barrage dans les classes de mauvaise et de très mauvaise qualité, on peut signaler également que la dégradation la plus marquée est enregistrée pendant la décennie **1990** et exceptionnellement pour les années **1993** et **1994**.

- **La Demande Chimique en Oxygène (DCO):**

Elle désigne la quantité d'oxygène en mg/l nécessaire pour oxyder les substances organiques à la fois non biodégradables et biodégradables (**Ramade, 2000**). Elle s'exprime par la quantité d'oxygène fournie par le bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) et nécessaire à l'oxydation des substances organiques (Protéines, glucides, lipides,...) présentes dans l'eau (**Rodier, 1996**).

Les valeurs obtenues varient entre **115 mg/l** et **10 mg/l**, la norme définie pour les eaux de surface de moyenne qualité (**Figure 29**) est dépassée dans plusieurs saisons. Ces importantes charges s'expliquent par l'apport important des rejets urbains et des matières organiques dues au charriage et à l'entraînement des déchets, des débris animaux et végétaux ainsi que les débris limoneux par les eaux de pluies en période de crues.

L'analyse de la **figure 37** montre que la variation de la DCO est proportionnelle à celle de la DBO<sub>5</sub> avec des valeurs nettement supérieures de la DCO, cette différence peut être expliquée par l'abondance des substances organiques non biodégradables.

#### IV-2-4-7 Evolution des paramètres azotés et de l'oxygène dissous

Le **tableau 40** résume la variation des paramètres azotés dans les eaux du barrage SMBA.

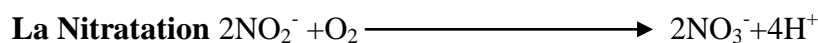
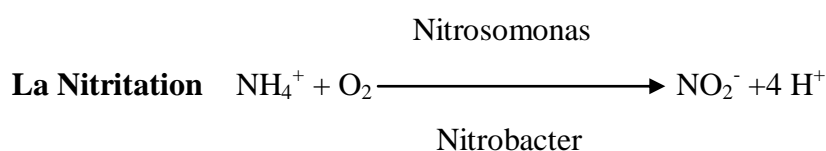
**Tableau 40: Variation des paramètres azotés et de l'oxygène dissous des eaux du barrage SMBA**

Saisons	Paramètres statistiques	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> en %
Hiver	Max	3,80	0,46	16,00	106,13
	Moy	0,34	0,16	7,85	86,30
	Min	0,00	0,02	3,33	76,23
	Ecart type	0,76	0,10	3,43	7,23
Printemps	Max	0,44	1,02	16,00	127,75
	Moy	0,13	0,19	8,52	90,49
	Min	0,00	0,03	3,67	71,53
	Ecart type	0,10	0,20	3,07	11,28
Été	Max	0,48	0,90	17,00	124,23
	Moy	0,15	0,16	6,69	93,04
	Min	0,00	0,04	3,00	40,05
	Ecart type	0,15	0,20	3,05	16,04
Automne	Max	4,23	3,38	13,00	98,37
	Moy	0,35	0,28	5,22	77,67
	Min	0,00	0,02	1,67	49,70
	Ecart type	0,81	0,64	2,60	10,06

- **Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

L'azote ammoniacal est une caractéristique des eaux riches en matières organiques puisque c'est le produit de leur dégradation. Il provient de l'hydrolyse des substances azotées rejetées dans l'eau et des fertilisants azotés d'origine agricole. L'ion **NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** est la forme chimique de l'azote minéral préférentiellement assimilée par le phytoplancton même en présence des nitrates.

Cet élément est assez souvent rencontré dans les eaux et traduit habituellement un processus de biodégradation incomplète de la matière organique, cependant, sa teneur devrait être relativement faible puisque l'ammonium est graduellement oxydé en nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) suivant les réactions :



**Remarque:** Nitrosomonas et Nitrobacter sont des bactéries aérobies.

L'azote ammoniacal des eaux superficielles peut avoir pour origine: la matière végétale des cours d'eau, la matière organique animale ou humaine (urées,...), les rejets industriels et les engrais (**Rodier, 1996**).

Les teneurs en ammonium dans les eaux du barrage varient de **0 mg/l** à **4,23 mg/l**. Selon **la figure 37**, la plus forte valeur en cet élément est observée en hiver **1989** et automne **1990 (4 mg/l)**.

- **Les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)**

Les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammonium, soit d'une réduction des nitrates. Du fait qu'elles ne présentent qu'un stade intermédiaire, les nitrites disparaissent très vite en milieu naturel (**Gaujons, 1995**).

La valeur moyenne la plus élevée (**3mg/l**), en cet élément, est observée pendant la saison d'automne 1987 et les autres valeurs fluctuent entre 0,02mg/l et 1,02mg/l.

L'analyse de **la figure 30** révèle une qualité mauvaise vis-à-vis l'ammonium et les nitrites dans plus de 60% des observations. Cette dégradation de la qualité peut être expliquée par le lessivage des sols par ruissellement, des apports de déchets d'origine végétale et animale riche en composés organiques azotés et des apports d'origine urbaine ou par la faible transformation de l'ammonium en nitrates.

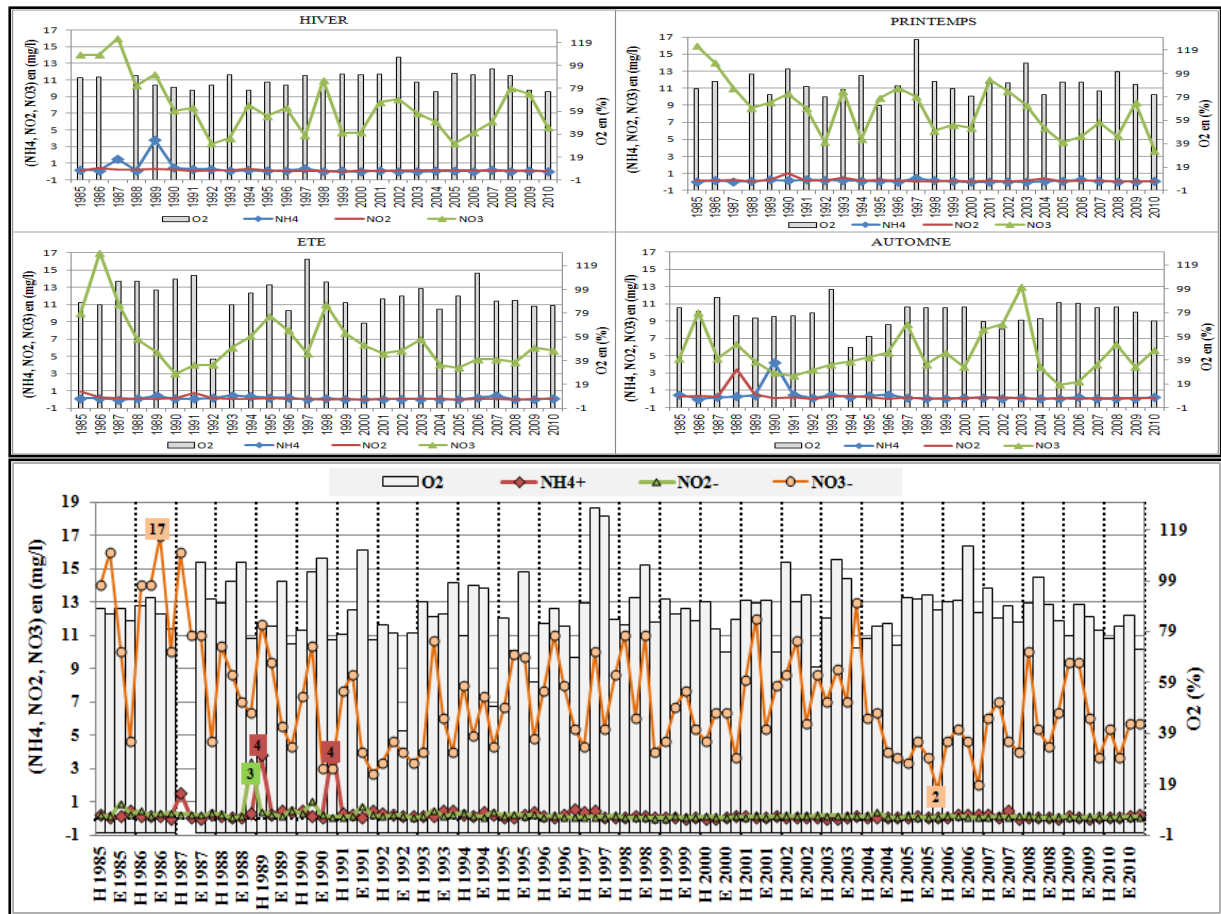


Figure 36: Evolution saisonnière des paramètres Azotés et de la saturation de l'eau sur la période 1985/2010.

- Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Toutes les formes de l'azote (azote organique, ammonium, nitrites,...) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. L'élévation de la teneur en nitrates dans les eaux superficielles est souvent liée au développement des élevages, à la fertilisation excessive des zones agricoles par les engrais, les fientes et par les fumiers divers. La présence d'ammoniaque indique une pollution récente ou un milieu dépourvu d'oxygène, celle des nitrates indique une pollution très ancienne ou plus lointaine en milieu oxygéné (Tarda Henry, 1984).

Les valeurs obtenues en cet élément fluctuent entre 17 mg/l et 1,67 mg/l, ces concentrations permettent de ranger l'eau du barrage dans les classes de bonne qualité et moyenne. La teneur la plus élevée en cet élément est enregistrée pendant la saison d'été 1986, les autres valeurs présentent une évolution temporelle en dents de scie traduisant une certaine instabilité et irrégularité.

**Remarque:** Dans les eaux naturelles, la dégradation des substances organiques est souvent liée à la disponibilité de l'oxygène dissous. Comme on vient de le constater les eaux du barrage SMBA sont souvent proche de la saturation en oxygène et en parallèle, les concentrations des paramètres  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{DCO}$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$  sont très élevées. Cette contradiction nous laisse penser que les



prélèvements d'eau ont été effectués en surface, où les teneurs en oxygène sont souvent très voisines de la saturation.

#### **IV-2-4-8 Aptitude des eaux du barrage SMBA à l'irrigation**

L'irrigation avec des eaux chargées en sels minéraux peut d'une part perturber le développement physique des plantes et d'autre part causer une dégradation des sols, par changement dans leurs structures (perméabilité, aération, ...).

La qualité des eaux destinées à l'irrigation est conditionnée principalement par la conductivité électrique donnée en  $\mu\text{s/cm}$  et le *Sodium Absorption ration* (SAR).

Comme on la mentionné précédemment, l'évolution de la conductivité de l'eau du barrage SMBA sur la période 1985-2010 permet d'avancer que pour les quatre saisons et sur l'ensemble de la période d'étude l'eau appartient à la classe C3: **Eau à forte salinité, non utilisable dans les sols à drainage restreint** à l'exception de l'été 1985 où la valeur de CE à atteint les  $2533\mu\text{s/cm}$  ce qui la range dans **la classe C4: Eau à très forte salinité inutilisable pour l'irrigation ( Selon la classification donnée dans le tableau 32).**

Les valeurs du SAR calculées à partir des teneurs en calcium, magnésium et sodium et à l'aide de **la formule 30** sont rapportées dans **le tableau V en annexes**. D'après ces valeurs du SAR obtenues ( $<10$ ), l'eau du barrage peut être placée dans la classe **A1: Taux faible du sodium, eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.**

Dans la plupart des cas et pour la prédiction de l'effet des eaux d'irrigation en considérant les deux critères en même temps (salinisation et sodium), la classification de **RIVERSID de l'USSS (1954)** est la plus utilisée. La projection des points sur le diagramme de Riverside représenté dans **la figure 26**, et qui repose sur le croisement des deux critères, est représentée dans **la figure 38** suivante.

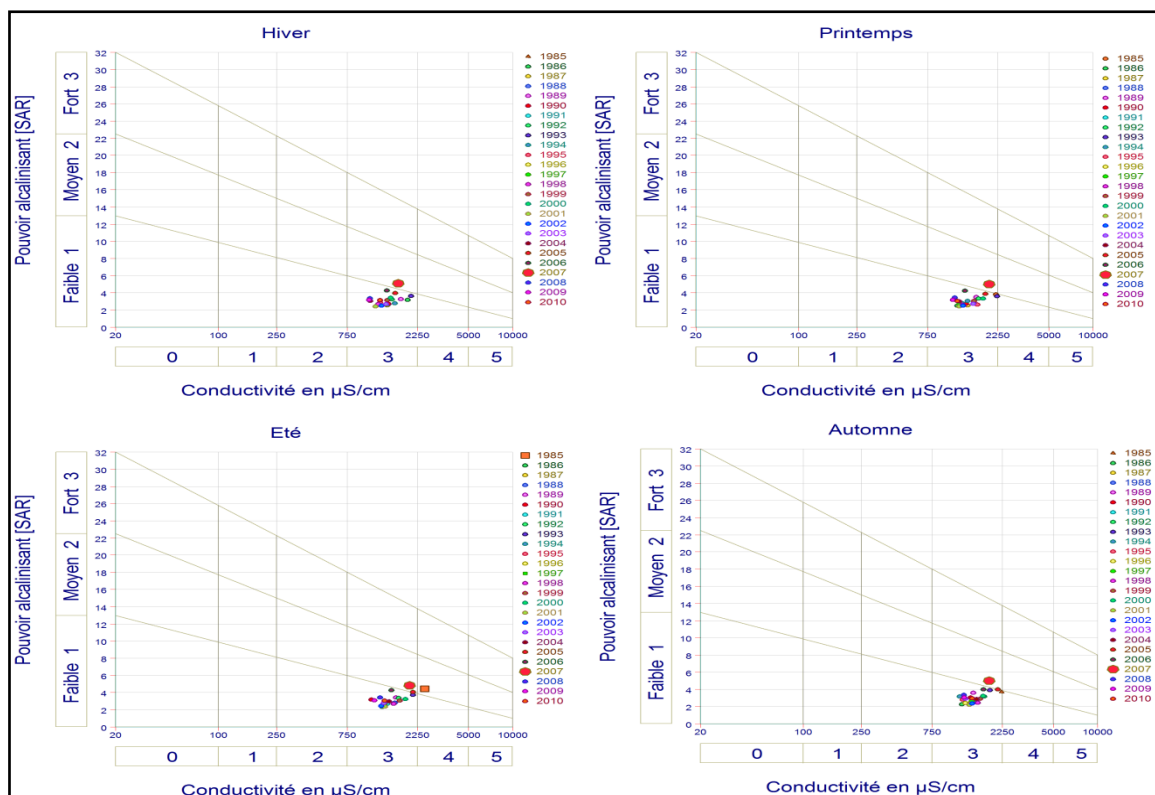


Figure 37: La projection des points sur le diagramme de REVERSIDE 1954 pour la période 1985/2010.

En analysant la figure 37 on constate que l'eau du barrage appartient majoritairement à la classe C3S1 mais pour l'année 2007 l'eau du barrage est rangée dans la classe C3S2: Ces deux classes sont dites de qualité moyenne à médiocre et l'eau est à utiliser avec précaution; nécessité d'un drainage avec des doses de lessivage.

Pour l'été 1985 l'eau du barrage appartient à la classe C4S2: Eau de qualité très mauvaise ne doit être utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages.

#### IV-2-5 Impact des contraintes climatiques sur l'évolution de la qualité des eaux du barrage SMBA

Comme il a été mentionné plus haut, les eaux du barrage sont caractérisées par une minéralisation forte, et des teneurs élevées vis-à-vis les paramètres  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{DCO}$ ,  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_2^-$ . Dans le but de cerner l'influence des épisodes secs et humides sur la cette dégradation, on va tenter de suivre l'évolution de chacun de ces paramètres en parallèle avec l'Indice Standardisé des Précipitations à une échelle de temps 3-mois.

IV-2-5-1 Evolution de la conductivité électrique et du SPI-3 sur la période 1985 à 2010.

L'analyse de la figure 38, montre que l'évolution de la conductivité électrique sur la période d'étude est caractérisée par un certain nombre de pics survenus pendant les années 1985 (été), 1993 (printemps), 2000 (été), 2005 (été et automne) et 2007 (printemps). Ces valeurs élevées en CE sont le résultat de la concentration des ions dans l'eau suite à une évaporation importante coïncidée avec des volumes faible de barrage. La diminution de volume du barrage est a lié en premier lieu aux sécheresses météorologiques survenues dans la région et qui sont illustrées dans la figure 38 par un indice SPI > (-1).

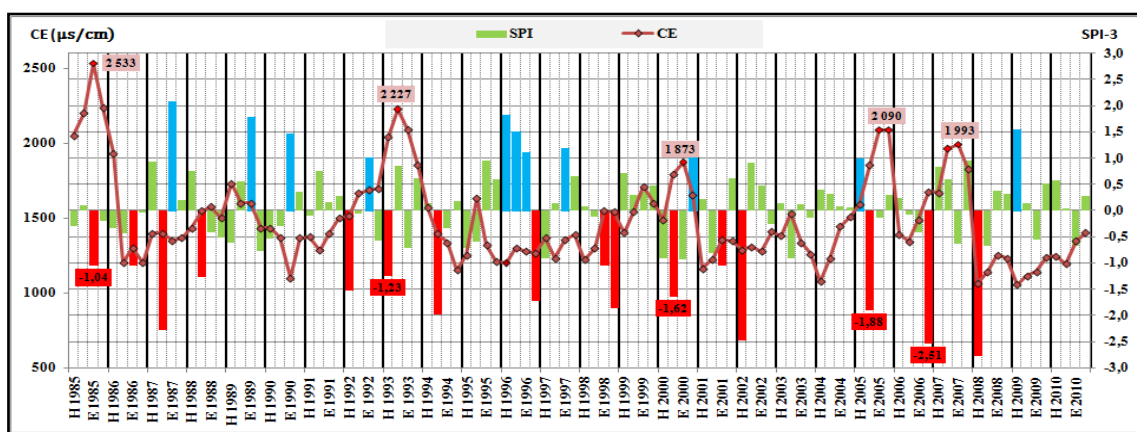


Figure 38: Evolution de la conductivité électrique et du SPI-3 sur la période 1985-2010.

IV-2-5-2 Evolution de l'anion Cl<sup>-</sup>, du cation Na<sup>+</sup> et du SPI-3 sur la période 1985 à 2010.

En analysant la figure 39, on constate une dégradation de la qualité des eaux vis-à-vis les paramètres Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> pendant les années 1985, 1989, 1993, 2005 et 2007. En parallèle des valeurs négatives de l'indice SPI-3, indiquant des sécheresses météorologiques plus au moins intenses et qui sont survenues dans la région pendant ces même années ou bien au cours de l'année qui précède le pic.

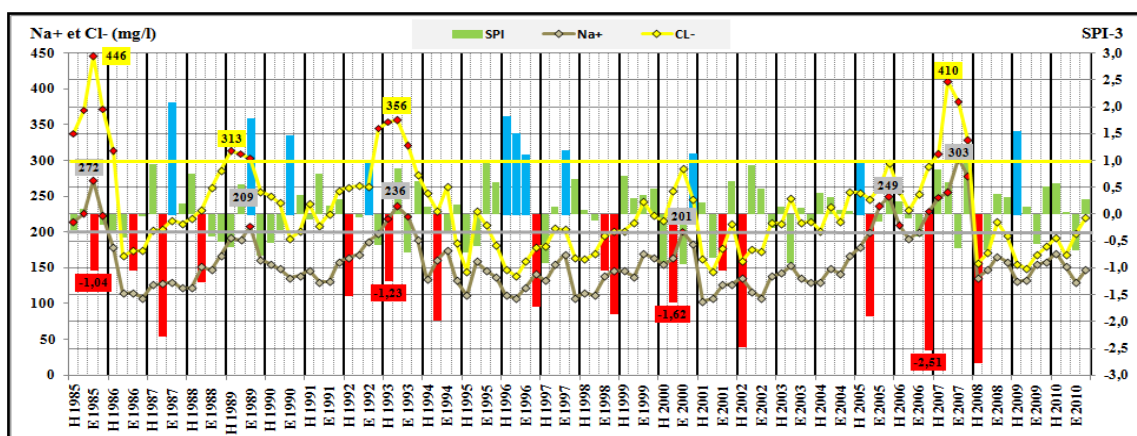


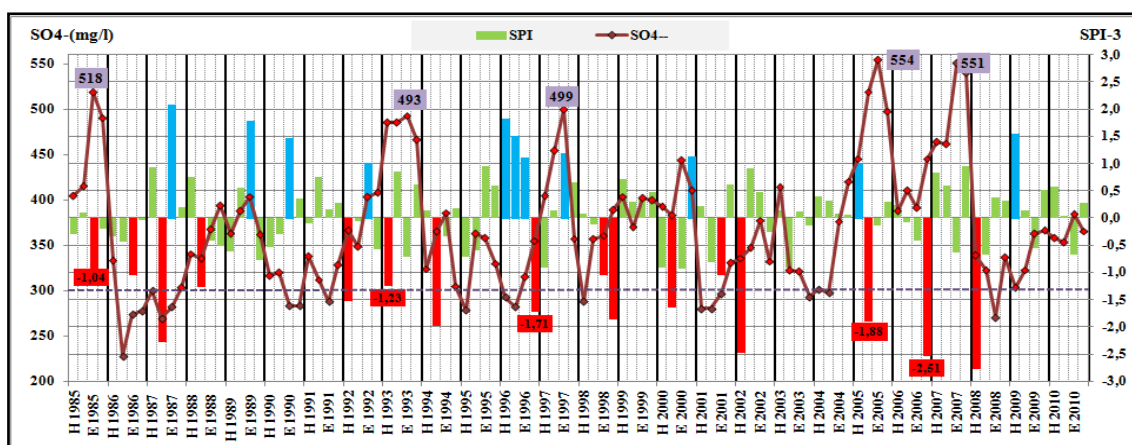
Figure 39: Evolution de l'anion Cl<sup>-</sup>, du cation Na<sup>+</sup> et du SPI-3 sur la période 1985-2010.

La concentration en Chlorure la plus élevée est enregistrée pour la saison d'été de l'année 1985 (**446 mg/l**), et elle coïncide avec la sécheresse estivale caractérisée par un **SPI-3** de **(-1,04)**. Pour l'année 2007 la concentration en chlorures a atteint la valeur de (**410 mg/l**), mais on constate l'absence de la sécheresse pour cette année, or l'analyse de **la figure 39** montre qu'une sécheresse automnale caractérisée par un **SPI-3** de **(-2,51)** a surgi dans la région pendant l'année 2006.

Pour le Sodium, la concentration la plus importante est enregistrée pour l'année **2007** (**303 mg/l**), cette élévation peut être le résultat de la diminution du volume du barrage suite à la sécheresse automnale survenue pendant l'année écoulée.

#### IV-2-5-3 Evolution des sulfates et du SPI-3 sur la période 1985-2010.

En analysant **la figure 40**, représentant l'évolution des sulfates et de SPI-3 sur la période d'étude, on peut constater une dégradation de la qualité des eaux du barrage sur la majeure partie de la période d'étude. Les pics enregistrés pendant les années **1985, 1993, 1997, 2005 et 2007**; coïncident souvent avec une sécheresse météorologique représentée par un **SPI-3** négatif.



**Figure 40: Evolution des sulfates et du SPI-3 sur la période 1985-2010.**

La concentration en sulfate la plus importante est enregistrée pour la saison d'été de l'année **2005** (**554 mg/l**), cette élévation peut être expliquée par la sécheresse survenue pendant la saison printanière et caractérisée par un **SPI-3** de **(-1,48)**.

#### IV-2-5-4 Evolution de la DBO<sub>5</sub>, DCO et du SPI-3 sur la période allant de 1985 à 2010.

L'analyse de **la figure 41** révèle une dégradation de la qualité des eaux du barrage vis-à-vis les paramètres DBO<sub>5</sub> et DCO. Les valeurs les plus élevées en ces deux paramètres sont

enregistrées durant les années 1985 (automne), 1993 (printemps et automne), 1994 (printemps) et 2006 (hiver).

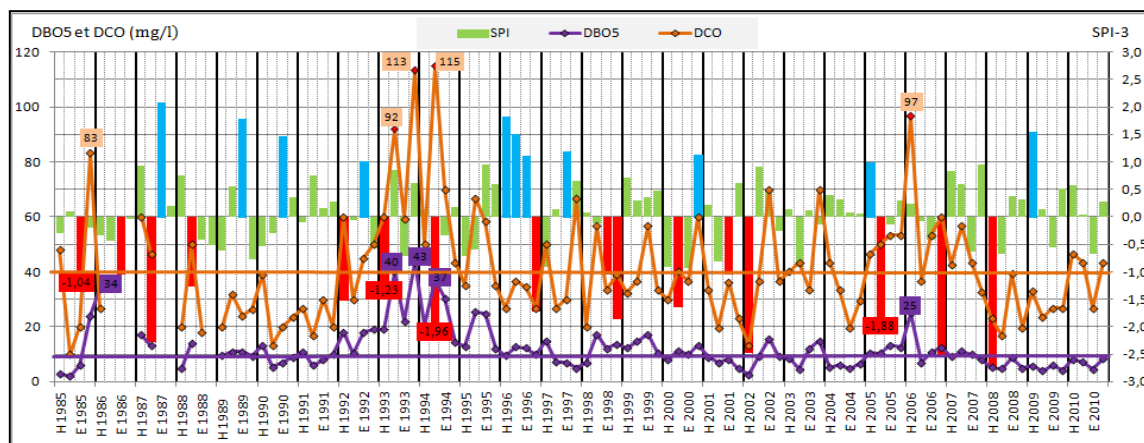


Figure 41: Evolution de la DBO5, DCO et du SPI-3 sur la période allant de 1985-2010.

La dégradation de la qualité des eaux du barrage peut être liée essentiellement aux volumes importants des eaux usées domestiques rejetées directement dans l'oued sans traitement, à quoi s'ajoutent les apports en matières organiques de l'oued Mina et ses affluents. On constate également que ses concentrations élevées coïncident le plus souvent avec des valeurs de précipitations élevées survenues dans la région et qui constituent le principal élément qui transporte ces impuretés.

#### IV-2-5-5 Evolution de l'ammonium, des nitrates et du SPI-3 sur la période allant de 1985 à 2010

L'analyse de la figure 42 montre une dégradation de la qualité des eaux vis-à-vis l'ammonium et les Nitrites. Les pics des nitrites et d'ammonium enregistrés respectivement en été 1988 et en hiver 1989 peuvent être expliqués par les apports importants en matières organiques en provenance des rejets d'eaux usées domestiques. Le pic d'ammonium enregistré en automne 1990 et coïncidant avec les précipitations estivales, peut être expliqué par la charge importante de la matière organique charrie par ruissellement des eaux sur l'ensemble du bassin versant.

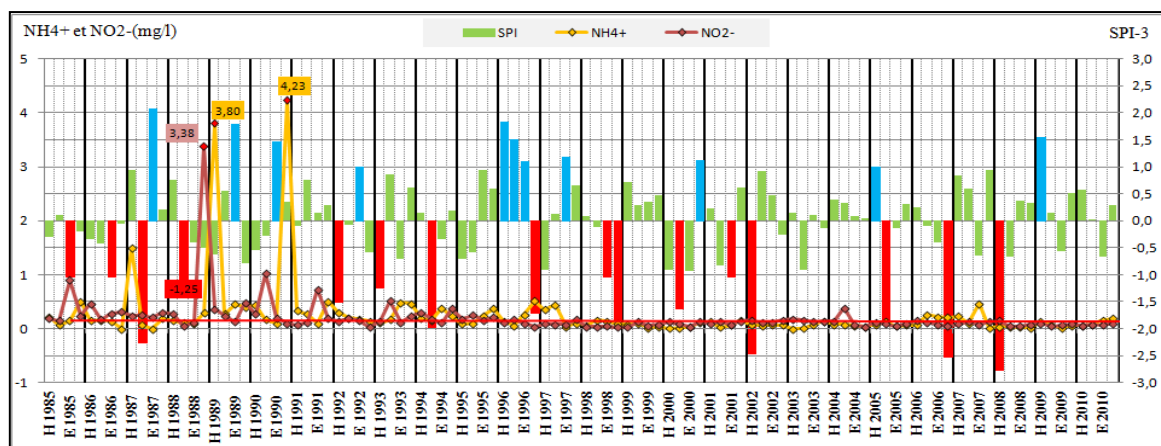


Figure 42: Evolution de l'ammonium, des nitrates et du SPI-3 sur la période 1985-2010.

Conclusion

A la fin de cette étude visant le suivi de l'évolution la qualité des eaux du barrage SMBA sur la période 1985-2010, on peut tirer les conclusions suivantes

- Les eaux du barrage sont en générale d'une mauvaise qualité vis-à-vis les paramètres  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , Les teneurs élevées des eaux en ces éléments sont principalement, d'une origine naturelle représentée par la dissolution des minéraux des terrains traversés par suite de la variabilité importante et favorable des conditions climatiques, qui s'est manifestée par l'augmentation de la récurrence et de la sévérité des sécheresses suivies par des brusques et violentes inondations. Les sècheresses survenues dans la région sont à l'origine de la diminution du volume du barrage et de ce fait l'augmentation de la concentration des éléments constitutifs. En outre, les pluies importantes qui succèdent ses épisodes secs, érodent les versants des oueds déjà affaiblis, et transportent ces constituants, y compris les eaux usées d'origine anthropique. En effet, ces effluents non traités et rejetés directement dans l'oued Mina et ses affluents sont la cause principale des teneurs élevées en  $DBO_5$ ,  $DCO$ ,  $NH_4^+$  et  $NO_2^-$ . Ces eaux usées peuvent également être à l'origine des apports considérables en chlorures et en sulfates.
- Selon la classification de **Riverside (1954)**, les eaux du barrage appartiennent à la classe de qualité moyenne à médiocre (**C3S1**), de ce fait, l'utilisation de cette eau pour l'irrigation doit être associée à un bon drainage et à des doses de lessivage.

## **Conclusion générale**

Au terme de ce travail, dont l'objectif principal été de caractériser les fluctuations du régime pluviométrique dans le bassin versant de la Mina et de spécifier leurs impacts sur la qualité des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, on peut retenir en premier lieu les différentes caractéristiques du bassin versant étudié. En effet, celui-ci présente:

- Une forme allongée suivant la direction Nord-Sud ( $K_c = 1,28$ ) avec un réseau hydrographique dense et ramifié.
- Une géologie dominée par:
  - Des calcaires et dolomies du jurassique moyen au Sud et au Sud-Ouest;
  - Du Jurassique supérieur dans la région centrale avec toujours des calcaires et dolomies alternant en générale avec des marnes claires et par endroits avec des calcaires sableux et des marnes gypseuses. La partie Est de cette même région est caractérisée par des grès et des marnes, tandis que le Nord-Ouest renferme des bancs calcaires et dolomies.
  - Des marnes gypseuses au Nord avec bancs de grès, des dépôts d'évaporites et des carbonates.
- Un régime climatique semi-aride méditerranéen, avec une température moyenne annuelle de  $19^{\circ}\text{C}$  et une lame d'eau moyenne précipitée de **294 mm**. Le régime saisonnier dominant dans la région est de type **HPAE** et on distingue, à l'échelle annuelle, une période sèche qui s'étend sur sept mois: de avril à octobre avec juillet et août comme période d'étiage prononcée du cours d'eau et une période humide qui s'étale sur le reste des mois de l'année.
- Le couvert végétal est très varié en allant de Nord vers le Sud. La partie nord du bassin manque de végétation naturelle durable, tandis que la partie Sud est caractérisée par une végétation plus au moins dense et parsemée.

En second lieu, la synthèse des résultats d'analyses effectuée sur les fluctuations du régime pluviométrique par l'application de la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (A.C.P) aux séries pluviométriques a montré une régionalisation bien distincte des stations dans la zone d'étude (stations situées au Nord, des stations situées au Sud et des stations situées au centre) et une variabilité temporelle caractérisée par l'alternance de trois phases (période allant de 1970 à 1980 considérée comme humide, décennie 1980 et début 1990 considérée comme sèche et la période qui s'étale de 1993 à 2009 marquée par l'alternance d'années sèches et humides). D'autre part, l'application des tests statistiques de détection de ruptures a montré une transition du régime pluviométrique entre les décennies 1970 et 1980, caractérisée par une baisse moyenne de 30 % enregistrée à la fin de la décennie

1970 et le début des années 1980. En outre, les tests ont montré une augmentation moyenne d'environ 90 % dans les moyennes des précipitations avant et après rupture pour l'année 2007.

Pour ce qui est de l'étude de la répartition spatio-temporelle des épisodes secs et humides via l'Indice Standardisé des Précipitations, calculé pour des cumuls pluviométriques annuels enregistrés dans les 16 stations étudiées; il ya lieu de signaler que sur la période allant 1970 à 2009 : On a recensé, Cinq années exceptionnellement Humides dans l'ensemble du bassin versant, à savoir, les années **1971/1972, 1972/1973, 1995/1996, 2007/2008 et 2008/2009**, Cinq années exceptionnellement sèches, à signaler **1981/1982, 1989/1990, 1992/1993, 1993/1994, 1998/1999** et en fin les trente années restantes sont considérées comme normales, dans lesquelles on peut rencontrer quelques stations sèches et/ou humides.

L'étude de l'évolution de la qualité des eaux du barrage SMBA sur la période 1985-2010 par l'interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques, chimiques et de pollution témoigne que :

Les eaux du barrage sont en général, d'une mauvaise qualité vis-à-vis les paramètres **Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, DBO<sub>5</sub>, DCO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>2</sub><sup>-</sup>**.

Il s'est avéré que les teneurs élevées des eaux en (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) proviennent de la dissolution des formations évaporitiques de trias qui affleurent dans le nord du bassin versant ainsi que des formations gypsifères du miocène des terrains traversés par suite de la variabilité importante et favorable des conditions climatiques, qui s'est manifestée par l'augmentation de la récurrence et de la sévérité des sécheresses suivies par des brusques et violentes inondations. Les sécheresses survenues dans la région sont à l'origine de la diminution du volume du barrage et de ce fait l'augmentation de la concentration des éléments constitutifs. En outre, les pluies importantes qui succèdent ses sécheresses érodent en premier lieu, les versants des oueds déjà affaiblis, ensuite elles acheminent ces constituants jusqu'à la retenue de barrage. Les teneurs élevées des paramètres (DBO<sub>5</sub>, DCO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ont pour origine les effluents d'eau usée, des populations riveraines, rejetés directement dans l'oued Mina et ses affluent sans aucun traitement.

Selon la classification de **Riverside (1954)**, les eaux du barrage appartiennent à la classe de qualité moyenne à médiocre (**C3S1**) vis à vis la salinité et le risque d'alcalinisation des sols, de ce fait, l'utilisation de cette eau pour l'irrigation doit être associée à un bon drainage et à des doses de lessivage.

En fin, dans le souci de préserver l'eau du barrage contre la pollution et d'en assurer la gestion rationnelle, il est souhaitable de prendre les mesures suivantes:



- En matière de gestion des eaux usées, il nous semble que la première action à envisager est de réaliser des stations d'épurations auxquelles il faut raccorder les réseaux d'égouts collectifs de chaque agglomération;
- Dans le but de prévenir l'envasement du barrage il faut prendre des mesures anti-érosion, en particulier, dans la zone des marnes de Nord.

*Références bibliographiques*

- ☒ **ABH-CZ, 2004.** Cadastre Hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff-Aval du barrage de Boughzoul. Deuxième partie, Bas Cheliff et Mina. 52p.
- ☒ **ABH-CZ, 2012.** Documentation de l'Agence de bassin Hydrographique Chélif-Zahrez.
- ☒ **ACHITE M., 1999.** Analyse multivariée de la variable " Erosion spécifique": Cas du bassin versant de l'oued Mina. Thèse de Magistère, E.N.S.H. Blida. 206p.
- ☒ **ACHITE M., 2007.** Problématique de l'érosion et de transport solide de l'Algérie de Nord. Cas du bassin versant de la Mina. Thèse de doctorat es Sciences, U.S.T. Oran. 210p.
- ☒ **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, 14-17 november.
- ☒ **ACHITE M., BELHADJ LARBI B., LAMRANI C. 2012.** Etude de la variabilité climatique dans le Nord-Ouest algérien (Bassin versant de l'oued Sly). Acte du Séminaire National. Irrigation en Algérie; enjeux et perspectives. Chlef, 29-30 Mai.
- ☒ **ACHITE M., MEDDI M., 2004.** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). Sécheresse N° 4, vol. 15.
- ☒ **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.
- ☒ **AGGOUSSINE M., 2003.** Hydrologie en régions arides et semi arides: cas du Sud-Est Marocain, terre et vie. N° 65, Juin.
- ☒ **AMEZIANE T., BELGHITI M., BENBENISTE S., 2006.** Guide pour la gestion de la sécheresse. Commission Européenne -Office de Coopération Europe-AID. Euro-Mediterranean, Regional Programme for Local Water Management (MEDA Water), 78 p. MEDROPLAN.
- ☒ **ANRH Alger, 2011:** Agence Nationale des Ressources Hydrique à Alger. données pluviométriques de la station de Sidi m'hamed ben Aouda. Doc. ANRH.
- ☒ **ANRH Oran, 2004.** Agence Nationale des ressources Hydriques d'Oran. Données de la qualité des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Doc. ANRH.
- ☒ **ANRH Relizane, 2012.** Agence Nationale des Ressources Hydriques Relizane. Données climatiques de la station de Relizane. Doc ANRH.
- ☒ **ARDOIN-BARDIN S. 2004.** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat. Univ. Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc. 440 p.

- ☒ **AYERS R.S., WESTCOT D.W., 1984.** La qualité de l'eau en irrigation. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 29 Rév. 165p.
- ☒ **BAIZE D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie. Edition INRA, Paris, 172p.
- ☒ **BERAN M.A., RODIER J.A., 1987.** Aspects hydrologique des sécheresses, UNESCO/OMM.
- ☒ **BISHOP C., 1995.** Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford: University Press. 498.p.
- ☒ **BONACCORSO B., BORDI I., CANCELLIERE A., ROSSI G., SUTERA A., 2003.** Spatial Variability of Drought: An Analysis of the SPI in Sicily. Water Resources Management 17: 273-296.
- ☒ **BOYER J.F., 1998.** Khronostat statistical time series analyses software. Montpellier: UMR 5569 Hydrosociences, IRD-Maison des sciences de l'eau.
- ☒ **BROCHET P. et GERBIER N., 1968.** L'Évapotranspiration, aspect agro-météorologique; évaluation pratique de l'ETP. Édit. Météorologie Nationale, Monographie n°65, 67 p.
- ☒ **BUICHAND T.A., 1984.** Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. Journal of Hydrology, vol. 73, 51-69.
- ☒ **CASTANY G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. 2<sup>ème</sup> cycle. édit. Dunod. Paris. 236 p.
- ☒ **CONDOM N., 2000.** Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger. Thèse de Doctorat. Ecole National Supérieur d'Agronomie de Montpellier. 240 p
- ☒ **COUGHLAN M.J., 1987.** Monitoring drought in Australia. In Planning for Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability, Wilhite DA, Easterling WE (eds). West View Press: Boulder, CO: 131-144.
- ☒ **COUTURE I., 2006.** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. Communication au colloque sur l'irrigation. L'eau, source de qualité et de rendement. Québec 10 février. 13 p.
- ☒ **DAGNELIE P., 1970.** Théorie et Méthodes Statistiques. Vol 2. Les presses agronomiques de Gembloux. 451 p.
- ☒ **DEBIECHE T.H., 2002.** évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. U.F.R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté. Ecole Doctorale Homme, Environnement, Santé. 199 p.
- ☒ **DEGREMONT., 1989.** Mémento technique de l'eau. Tome I .9<sup>ème</sup> Edit. 592 p.

- ☒ **DOUAOUI A., HARTANI T., LAKHAL M., 2006.** La salinisation dans la plaine du Bas-Chelif: acquis et perspectives. Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet SIRMA, Marrakech, Maroc, 29-31 mai.
- ☒ **DURAND J.H., 1982.** Les sols irrigables. Edit. P.U.F. Paris. 340 p.
- ☒ **EDWARDS D., Mc KEE T., 1997.** Characteristics of 20<sup>th</sup> century drought in the United States at multiple time scales. Climatology report No. 97-2. Paper No. 634. (Fort Collins Colorado): Colorado State University, Department of Atmospheric Sciences.
- ☒ **ELLOUZE M., ABIDA H., 2008.** Caractérisation de la sécheresse au sud Tunisien, 13th World Water Congress, Montpellier, France, 14 p.
- ☒ **Encyclopédie des sciences de la nature, Larousse., 1995.**
- ☒ **GAID A., 1984.** Epuration biologique des eaux usées urbaines. Tome I. p(1).
- ☒ **GAUJONS D., 1995.** La pollution des milieux aquatiques. Aide memoire. 2<sup>ème</sup> Edit. technique et documentation. 220 p.
- ☒ **GEBREHIWOT T., VAN DER VEEN A., B. MAATHUIS 2010.** Spatial and temporal assessment of drought in the Northern highlands of Ethiopia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13: 309-321.
- ☒ **GERRARD G., 1999:** Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés. Préface de Jean Mamy 2<sup>ème</sup> Edit. Dunod. 300 P.
- ☒ **GIDDING L., SOTO M., RUTHERFORD B.M., MAAROUF A., 2005.** Standardized precipitation index zones for Mexico. Atmosfera 18: 33-56.
- ☒ **GROSCLAUDE G., 1999.** L'eau usage et pollution. Edit. INRA. 144 p.
- ☒ **GUTTMAN N.B., 1998.** Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. J. Am. Water Resour. Assoc. 34, 113-121.
- ☒ **HARIVANDI A., 1999.** Interpreting turfgrass irrigation Water test result. Water journal of California, Publication 8009, University of California, Division of agriculture and natural resources. 9p.
- ☒ **HAYES M.J., 2000.** Revisiting the SPI: clarifying the process. Drought Network News 1: 13-14.
- ☒ **HAYES M.J., SVOBODA M.D., WILHITE D.A., VANYARKHO O., 1999.** Monitoring the 1996 drought using the SPI. Bulletin of the American Meteorological Society 80, 429-438.
- ☒ **HEIM R.R., 2002.** A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 83: 1149–1165.

- ☒ **HUBERT P., CARBONNEL J.P., CHAUCHE A., 1989.** Segmentation des séries hydrométéorologiques: Application à des séries de précipitations et de débits en Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology* 110: 349-67.
- ☒ **I.F.G., 1987.** Projet d'aménagement intégré du bassin versant de l'oued Mina. Institut des géosciences appliquées, D-6050 Offenbach. République Fédérale d'Allemagne.
- ☒ **ISABELLA B., et al., 2001.** The analysis of the Standardized Precipitation Index in the Mediterranean area: large-scale patterns. *Annali Di Geofisica*, 44, N. 5/6, October/December.
- ☒ **KASEI R., DIEKKRU B., LEEMHUIS C., 2009.** Drought frequency in the Volta Basin of West Africa. *Water Resour. Manage.* 23:439-455.
- ☒ **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, 12p.
- ☒ **KEYANTAS H J., DRACUP J.A., 2002.** The quantification of drought: an evaluation of drought indices, *Bulletin of the Amer. Meteorol. Society*, 83:1167–1180.
- ☒ **KHALDI A., 2005.** Impact 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.
- ☒ **LABEDZKI L., 2007.** Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index (SPI). *Irrig. And Drain.* 56: 67-77.
- ☒ **LAIN M.M., 2005.** Agricultural vulnerability to drought: A comparative study in Morocco and Spain, Thesis, IAMZ-CIHEAM Zaragoza, Spain.
- ☒ **Le HOUEROU H.N, 1995.** Bioclimatologie et Biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification. Option méditerranéenne. Série B : études et recherches N° 10; Cheam. Montpellier, 397 p.
- ☒ **LEE A.F.S., HEGHINIAN S.M., 1977.** A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables -A bayesian approach. *Technometrics* 19: 503-506.
- ☒ **LIVADA I., ASSIMAKOPOULOS V.D., 2007.** Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology.* 89: 143-153.
- ☒ **LLOYD-HUGHES B., SAUNDERS MA., 2002.** A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22: 1571-1592.
- ☒ **LUBÈS H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAMÉ B., BOYER J.F., 1994.** Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Étude bibliographique. Programme ICCARE, Rapport N° 3, ORSTOM, Montpellier, France. 21 p.

- ☒ **MABILLOT A., 1979.** Le forage d'eau. Guide pratique. Edit. Crépine Johnson. Tec et Doc. Paris. 235p.
- ☒ **MAHÉ G., OLIVRY J.C., 1995.** Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6: 109-117.
- ☒ **Mc KEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., 1993.** The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints Eighth Conf on Applied Climatology Anaheim CA. Amer Meteor Soc, 179–184.
- ☒ **MC KEE T.B.N., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1995.** Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology, 15-20 January Dallas, TX. Amer. Meteorol. Society Boston, 233-236.
- ☒ **MEDDI H., et 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.
- ☒ **MORID S., SMAKHTIN V., MOGHADDASI M., 2007.** Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int. J. of Climatol.* 26: 971-985.
- ☒ **NDMC, 2008.** National Drought Mitigation Center; Consulté en ligne :<http://enso.unl.edu/ndmc>.
- ☒ **NTALE H.K., GAN T.W., 2003.** Drought indices and their application to East Africa, *Int. J. of Climatol.* 23: 1335-1357.
- ☒ **NUNEZ-LOPEZ D., MUNOZ ROBLES C.A., GADSDEN H., REYES GOMEZ V.M., 2006.** Caractérisation, à diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'État de Chihuahua (Mexique), *Sécheresse* 17: 467-474.
- ☒ **OLIVIER A., 2005.** Chimie et pollution des eaux souterraines. Edition Tec et Doc. Lavoisier. ISBN. 67 P.
- ☒ **OLLIER C.H. et POIREE M., 1986.** Irrigation, les réseaux d'irrigation: Théorie, technique et économie des arrosages. Edt. EYROLES. Paris. 503 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.
- ☒ **ONM Alger, 2011.** Office National de la Météorologie. Données climatiques de la station météorologique du barrage SMBA, Période 1978-2010. Doc. ONM.
- ☒ **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.

- ☒ **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.
- ☒ **PESSON P., 1980.** La pollution des eaux continentales, indice sur la biocénose aquatique. 2<sup>ème</sup> Edition. Edit. Gauthier Villas. 345 p.
- ☒ **Pettitt A.N., 1979.** A non-parametric approach to the change-point problem.- *Appl.Statist.*, 28:126-135.
- ☒ **PITAUD S., 1976.** Etude hydrogéologique des bassins de El Abd et El Taht. Rapport de synthèse. ANRH Alger.
- ☒ **RAKOTONDRABE F., 2007.** Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21: Cas du bassin versant de Morondava (Sud-Ouest de Madagascar). Mémoire de recherches pour l'obtention du diplôme d'études approfondies en hydrogéologie. 87 P.
- ☒ **RAMADE F., 2000.** Les polluants de l'environnement à l'homme. 121 p.
- ☒ **RAZIEI T., SAGHAFIAN B., PAULO A.A., PEREIRA L., BORDI S I., 2008.** Spatial Patterns and Temporal Variability of Drought in Western Iran. *Water Resources Management* 23:439-455.
- ☒ **REMENIERAS G., 1976.** L'hydrologie de l'ingénieur. 2<sup>ème</sup> édition. Edit. EYROLLES, Paris, 265 p.
- ☒ **RICHARDS L.A., 1954.** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA, in: *Agricultural Handbook* 60, Washington, 160 p.
- ☒ **RICHARDS W., 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.
- ☒ **RIEUL L., RUELLE P., 2003.** Irrigation- Guide pratique 3<sup>ème</sup> édition Cemagref.
- ☒ **RODIER J., 1984.** L'analyse de l'eau, eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. 8<sup>ème</sup> édition: Dunod, Paris.
- ☒ **RODIER J., 1996.** L'analyse de l'eau, eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. 8<sup>ème</sup> Edition. Edit. Dunod. Paris.1383p.
- ☒ **RODIER J., 2005.** L'analyse de l'eau, eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. 8<sup>ème</sup> Edition. Edit. Dunod, Paris.1383p.
- ☒ **ROUDIER P., MAHE G., 2009.** Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani river, Niger basin, (Mali). *Int. J. Climatol.* 30: 1689-1705.

- ☒ **ROUX J., 2000.** les secrets de la terre. l'eau source de vie. Edit. BRGM. Orléans -la campagne de livre. Paris.
- ☒ **SARR M. A., 2008.** Variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest: Dynamique des espaces végétaux à partir des images satellitaires. Exemple du bassin versant du férlo Sénégal). Journées de Climatologie. Nantes, 13-14 mars. 76 p.
- ☒ **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.
- ☒ **SÖMNEZ F.K., KÖMÜSCÜ A.Ü., ERKAN A., TURGU E., 2005.** An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the Standardized precipitation Index. Natural Hazards 35: 243-264.
- ☒ **SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.S., LASM T., 2011.** la variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de grand-lahou sud-ouest de la côte d'ivoire).- Géographie Physique et Environnement, vol. V.
- ☒ **STRICEVIC R., DJUROVIC N., DJUROVIC Z., 2011.** Drought classification in Northern Serbia based on SPI and statistical pattern recognition. Meteorol. Appl. 18: 60-69.
- ☒ **SVOBODA M., Le COMPTE D., HAYES M., HEIM R., GLEASON K., 2002.** The drought monitor, Bull. Amer. Meteorol. Soc. 83: 1181-1190.
- ☒ **TARDA H., BEAUDRY J.P., 1984.** Chimie des eaux .Les Editions Le griffon d'argile Inc. Québec.
- ☒ **THOM H.C.S., 1966.** Some methods of climatological analysis. WMO Technical Note, N°81. Geneva: World Meteorological Organization.
- ☒ **TOMMY K., 2009.** Comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l'aide d'indices climatiques. BSGLg, 53: 75-86.
- ☒ **TOUAIBIA B., 2005.** Erosion-Transport solide-Envasement de barrage Cas de bassin versant de l'oued Mina- Wilaya de Relizane- Thèse de doctorat d'Etat en sciences Agronomiques. I.N.A. Algérie. 175 p.
- ☒ **VALIRON F., 1989.** Gestion des eaux: alimentation en eau, assainissement. Edit. PENPC .501 p.
- ☒ **VICENTE-SERRANO S.M., et al 2004:** Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain) Clim. Res. 26: 5-15.
- ☒ **WU H., HAHYES M.J., WEISS A., HU Q., 2001.** An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China Z-index and the statistical Z-score. International J. of Climatol. 21: 745-758.



☒ **WU H., HAYES M. J., WILHITE, D. A., SVOBODA M.D., 2005.** The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation, *International J. of Climatol.* 25: 505-520.

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

☒ **YOUNG K.C., 1992.** A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. *Mon. Weather Rev.* 120: 2561-2569.

**Tableau I: Le régime saisonnier pour chaque année sur la période d'étude (1970/2009) pour la station météorologique du barrage "Sidi M'hamed Ben Aouda".**

Années	Régimes	Années	Régimes	Années	Régimes	Années	Régimes
1970	PHAE	1980	HPAE	1990	PAHE	2000	AHPE
1971	PHAE	1981	HPAE	1991	PAHE	2001	PAHE
1972	HPAE	1982	AHPE	1992	PAHE	2002	HPAE
1973	PHAE	1983	PHAE	1993	AHPE	2003	PHAE
1974	PAHE	1984	AHPE	1994	APHE	2004	HAPE
1975	PHAE	1985	HPAE	1995	HPAE	2005	HAPE
1976	AHPE	1986	HPAE	1996	HAEP	2006	HPAE
1977	HPAE	1987	HAPE	1997	AHPE	2007	APEH
1978	HAPE	1988	PHAE	1998	HPAE	2008	HPAE
1979	PHAE	1989	PHAE	1999	AHPE	2009	HPAE

**Tableau II: Le bloc sous-diagonal de la matrice des corrélations.**

Stations	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
S1	1,00															
S2	0,69	1,00														
S3	0,65	0,70	1,00													
S4	0,66	0,68	0,89	1,00												
S5	0,39	0,62	0,74	0,70	1,00											
S6	0,44	0,47	0,72	0,73	0,66	1,00										
S7	0,27	0,28	0,58	0,63	0,44	0,51	1,00									
S8	0,34	0,38	0,58	0,72	0,52	0,50	0,64	1,00								
S9	0,49	0,45	0,76	0,81	0,48	0,64	0,60	0,73	1,00							
S10	0,46	0,38	0,64	0,63	0,45	0,44	0,52	0,65	0,73	1,00						
S11	0,61	0,70	0,81	0,78	0,54	0,65	0,50	0,51	0,67	0,63	1,00					
S12	0,58	0,63	0,74	0,81	0,39	0,62	0,62	0,66	0,76	0,61	0,78	1,00				
S13	0,59	0,72	0,74	0,74	0,62	0,75	0,45	0,42	0,58	0,51	0,87	0,68	1,00			
S14	0,59	0,68	0,74	0,77	0,58	0,70	0,45	0,48	0,62	0,58	0,91	0,72	0,93	1,00		
S15	0,58	0,72	0,74	0,70	0,62	0,56	0,37	0,35	0,49	0,53	0,75	0,61	0,77	0,84	1,00	
S16	0,59	0,71	0,74	0,74	0,61	0,61	0,43	0,45	0,54	0,54	0,87	0,66	0,88	0,93	0,77	1,00

**Tableau III: Valeurs de l'I S P-3 pour chaque saison sur la période allant de 1971/2010 pour la station pluviométrique de Sidi M'hamed Ben Aouda (S16).**

Années	DJF	MAM	JJA	SON	Années	DJF	MAM	JJA	SON
1971/72	-0,70	1,81	-0,10	1,29	1991/92	-0,1	0,76	0,15	0,28
1972/73	0,91	0,26	-0,49	0,33	1992/93	-1,5	-0,07	1,01	-0,58
1973/74	1,04	0,02	1,32	-0,24	1993/94	-1,23	0,86	-0,71	0,62
1974/75	0,38	1,39	0,09	0,74	1994/95	0,14	-1,96	-0,34	0,18
1975/76	-1,31	1,69	-0,19	-0,56	1995/96	-0,71	-0,59	0,95	0,6
1976/77	0,64	1,46	1,52	0,74	1996/97	1,83	1,51	1,11	-1,71
1977/78	-0,69	-0,03	0,96	0,37	1997/98	-0,91	0,13	1,19	0,66
1978/79	0,94	0,67	-1,04	0,93	1998/99	0,08	-0,12	-1,04	-1,85
1979/80	-0,09	-0,02	-0,58	0,15	1999/00	0,71	0,29	0,35	0,48
1980/81	0,88	0,8	-0,43	-0,94	2000/01	-0,92	-1,62	-0,93	1,13
1981/82	1,55	-0,03	-0,28	-2,12	2001/02	0,22	-0,82	-1,04	0,62
1982/83	0,3	-0,76	-0,73	1,33	2002/03	-2,45	0,91	0,47	-0,26
1983/84	-0,59	-1,52	-1,04	-1,17	2003/04	0,14	-0,91	0,11	-0,14
1984/85	-0,08	1,08	1,31	0,03	2004/05	0,4	0,32	0,08	0,05
1985/86	-0,3	0,1	-1,04	-0,19	2005/06	1	-1,88	-0,14	0,3
1986/87	-0,34	-0,43	-1,04	-0,05	2006/07	0,24	-0,09	-0,41	-2,51
1987/88	0,93	-2,26	2,08	0,2	2007/08	0,83	0,6	-0,64	0,95
1988/89	0,76	-1,25	-0,41	-0,51	2008/09	-2,76	-0,67	0,37	0,32
1989/90	-0,62	0,56	1,79	-0,78	2009/10	1,54	0,14	-0,56	0,52
1990/91	-0,54	-0,29	1,47	0,35	2010/11	0,58	0,03	-0,67	0,28



**Tableau V: Les valeurs du SAR des eaux du barrage pour chaque saison sur la période d'étude.**

Saisons	SAR	Saisons	SAR	Saisons	SAR	Saisons	SAR
H 1985	3,68	E 1991	2,51	H 1998	2,42	E 2004	2,89
P 1985	3,83	A 1991	3,14	P 1998	2,31	A 2004	3,24
E 1985	4,42	H 1992	2,96	E 1998	2,93	H 2005	3,28
A 1985	3,71	P 1992	3,13	A 1998	2,81	P 2005	3,60
H 1986	3,20	E 1992	3,54	H 1999	2,98	E 2005	4,45
P 1986	2,53	A 1992	3,53	P 1999	2,72	A 2005	4,62
E 1986	2,34	H 1993	3,68	E 1999	3,35	H 2006	4,32
A 1986	2,28	P 1993	3,94	A 1999	3,10	P 2006	3,90
H 1987	2,55	E 1993	3,84	H 2000	3,01	E 2006	4,13
P 1987	2,58	A 1993	3,43	P 2000	3,10	A 2006	4,47
E 1987	2,57	H 1994	2,48	E 2000	3,73	H 2007	4,67
A 1987	2,37	P 1994	3,26	A 2000	3,39	P 2007	4,75
H 1988	2,23	E 1994	3,18	H 2001	2,14	E 2007	5,41
P 1988	2,93	A 1994	2,79	P 2001	2,26	A 2007	5,14
E 1988	2,82	H 1995	2,33	E 2001	2,58	H 2008	3,02
A 1988	2,95	P 1995	3,03	A 2001	2,45	P 2008	3,35
H 1989	3,37	E 1995	2,89	H 2002	2,76	E 2008	3,72
P 1989	3,54	A 1995	2,81	P 2002	2,33	A 2008	3,51
E 1989	3,81	H 1996	2,36	E 2002	2,15	H 2009	2,91
A 1989	3,12	P 1996	2,27	A 2002	2,62	P 2009	2,97
H 1990	2,97	E 1996	2,52	H 2003	2,73	E 2009	3,35
P 1990	2,84	A 1996	2,82	P 2003	3,02	A 2009	3,38
E 1990	3,01	H 1997	2,50	E 2003	2,71	H 2010	3,60
A 1990	2,92	P 1997	3,03	A 2003	2,70	P 2010	3,11
H 1991	2,75	E 1997	3,28	H 2004	2,72	E 2010	2,65
P 1991	2,60	A 1997	2,08	P 2004	3,04	A 2010	2,92

**Tableau VI: L'indice de saturation des minéraux dissous pour chaque saison sur la période d'étude 1985/2010.**

Saisons	Anhydrite	Gypse	Calcite	Dolomite	Saisons	Anhydrite	Gypse	Calcite	Dolomite
H1985	-1,29	-1,07	<b>0,94</b>	<b>2,06</b>	H1998	-1,40	-1,18	<b>0,37</b>	<b>0,72</b>
P1985	-1,26	-1,04	<b>1,04</b>	<b>2,22</b>	P1998	-1,33	-1,11	<b>0,18</b>	<b>0,37</b>
E1985	-1,19	-0,98	<b>0,88</b>	<b>1,96</b>	E1998	-1,45	-1,23	<b>0,08</b>	<b>0,38</b>
A1985	-1,23	-1,01	<b>0,76</b>	<b>1,76</b>	A1998	-1,30	-1,08	<b>0,64</b>	<b>1,38</b>
H1986	-1,41	-1,19	<b>0,78</b>	<b>1,81</b>	H1999	-1,37	-1,15	<b>0,46</b>	<b>1,09</b>
P1986	-1,61	-1,39	<b>0,89</b>	<b>1,96</b>	P1999	-1,31	-1,09	<b>0,83</b>	<b>1,69</b>
E1986	-1,53	-1,31	<b>1,11</b>	<b>2,45</b>	E1999	-1,37	-1,15	<b>0,79</b>	<b>1,78</b>
A1986	-1,46	-1,24	<b>0,94</b>	<b>1,95</b>	A1999	-1,27	-1,05	<b>0,96</b>	<b>1,98</b>
H1987	-1,42	-1,20	<b>0,98</b>	<b>2,05</b>	H2000	-1,29	-1,07	<b>0,70</b>	<b>1,46</b>
P1987	-1,47	-1,25	<b>0,85</b>	<b>1,80</b>	P2000	-1,28	-1,06	<b>0,59</b>	<b>1,23</b>
E1987	-1,44	-1,22	<b>0,88</b>	<b>1,87</b>	E2000	-1,29	-1,07	<b>0,39</b>	<b>0,96</b>
A1987	-1,40	-1,18	<b>0,67</b>	<b>1,45</b>	A2000	-1,24	-1,02	<b>0,15</b>	<b>0,32</b>
H1988	-1,31	-1,09	<b>0,93</b>	<b>1,94</b>	H2001	-1,39	-1,17	<b>0,47</b>	<b>0,91</b>
P1988	-1,31	-1,09	<b>0,82</b>	<b>1,63</b>	P2001	-1,40	-1,19	<b>0,15</b>	<b>0,27</b>
E1988	-1,33	-1,11	<b>0,90</b>	<b>1,90</b>	E2001	-1,36	-1,14	<b>0,26</b>	<b>0,45</b>
A1988	-1,33	-1,11	<b>0,34</b>	<b>0,92</b>	A2001	-1,48	-1,26	<b>0,43</b>	<b>1,18</b>
H1989	-1,30	-1,08	<b>0,92</b>	<b>1,94</b>	H2002	-1,32	-1,10	<b>0,85</b>	<b>1,65</b>
P1989	-1,25	-1,03	<b>0,77</b>	<b>1,52</b>	P2002	-1,31	-1,09	<b>0,15</b>	<b>0,30</b>
E1989	-1,38	-1,16	<b>0,48</b>	<b>1,25</b>	E2002	-1,29	-1,07	<b>0,56</b>	<b>1,14</b>
A1989	-1,34	-1,12	<b>0,59</b>	<b>1,27</b>	A2002	-1,43	-1,21	<b>0,35</b>	<b>0,95</b>
H1990	-1,35	-1,13	<b>0,95</b>	<b>1,92</b>	H2003	-1,44	-1,22	-0,08	<b>0,21</b>
P1990	-1,36	-1,14	<b>0,93</b>	<b>1,93</b>	P2003	-1,36	-1,14	<b>0,35</b>	<b>0,73</b>
E1990	-1,47	-1,25	<b>0,81</b>	<b>1,67</b>	E2003	-1,35	-1,13	<b>0,61</b>	<b>1,23</b>
A1990	-1,46	-1,24	<b>0,86</b>	<b>1,79</b>	A2003	-1,41	-1,19	<b>0,37</b>	<b>0,74</b>
H1991	-1,38	-1,16	<b>1,02</b>	<b>2,22</b>	H2004	-1,45	-1,23	<b>0,26</b>	<b>0,65</b>
P1991	-1,42	-1,20	<b>0,53</b>	<b>1,19</b>	P2004	-1,36	-1,14	<b>0,76</b>	<b>1,43</b>
E1991	-1,50	-1,28	<b>0,80</b>	<b>1,87</b>	E2004	-1,41	-1,19	<b>0,35</b>	<b>0,91</b>
A1991	-1,34	-1,13	<b>0,59</b>	<b>1,19</b>	A2004	-1,27	-1,05	<b>0,55</b>	<b>1,14</b>
H1992	-1,34	-1,12	<b>0,84</b>	<b>1,86</b>	H2005	-1,24	-1,02	<b>0,90</b>	<b>1,90</b>
P1992	-1,33	-1,11	<b>0,93</b>	<b>1,95</b>	P2005	-1,29	-1,07	<b>0,29</b>	<b>0,88</b>
E1992	-1,26	-1,04	<b>0,77</b>	<b>1,58</b>	E2005	-1,21	-0,99	-0,01	<b>0,12</b>
A1992	-1,29	-1,07	<b>0,78</b>	<b>1,72</b>	A2005	-1,32	-1,10	<b>0,35</b>	<b>0,99</b>
H1993	-1,21	-0,99	<b>0,83</b>	<b>1,85</b>	H2006	-1,39	-1,17	<b>0,31</b>	<b>0,77</b>
P1993	-1,18	-0,96	<b>0,78</b>	<b>1,69</b>	P2006	-1,38	-1,16	<b>0,41</b>	<b>0,99</b>
E1993	-1,12	-0,90	<b>0,98</b>	<b>1,93</b>	E2006	-1,49	-1,27	<b>0,25</b>	<b>0,84</b>
A1993	-1,15	-0,93	<b>0,75</b>	<b>1,45</b>	A2006	-1,32	-1,10	<b>0,12</b>	<b>0,41</b>
H1994	-1,29	-1,07	<b>0,92</b>	<b>1,79</b>	H2007	-1,22	-1,00	<b>0,32</b>	<b>0,67</b>
P1994	-1,34	-1,12	<b>0,69</b>	<b>1,44</b>	P2007	-1,32	-1,10	<b>0,42</b>	<b>1,06</b>
E1994	-1,30	-1,08	<b>0,70</b>	<b>1,54</b>	E2007	-1,23	-1,01	<b>0,27</b>	<b>0,75</b>
A1994	-1,42	-1,20	<b>0,89</b>	<b>1,82</b>	A2007	-1,17	-0,95	<b>0,17</b>	<b>0,38</b>
H1995	-1,39	-1,17	<b>0,85</b>	<b>1,62</b>	H2008	-1,43	-1,21	<b>0,16</b>	<b>0,42</b>
P1995	-1,31	-1,09	<b>0,83</b>	<b>1,73</b>	P2008	-1,38	-1,16	<b>0,28</b>	<b>0,43</b>
E1995	-1,32	-1,10	<b>0,77</b>	<b>1,57</b>	E2008	-1,45	-1,23	<b>0,40</b>	<b>0,71</b>
A1995	-1,36	-1,14	<b>0,70</b>	<b>1,42</b>	A2008	-1,38	-1,16	-0,06	-0,16
H1996	-1,39	-1,17	<b>0,95</b>	<b>1,86</b>	H2009	-1,38	-1,16	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>
P1996	-1,39	-1,17	<b>0,99</b>	<b>1,92</b>	P2009	-1,37	-1,15	<b>0,43</b>	<b>0,77</b>
E1996	-1,36	-1,14	<b>0,75</b>	<b>1,50</b>	E2009	-1,45	-1,23	<b>0,57</b>	<b>1,34</b>
A1996	-1,31	-1,09	<b>0,50</b>	<b>1,01</b>	A2009	-1,40	-1,18	<b>0,43</b>	<b>0,99</b>
H1997	-1,25	-1,03	<b>0,48</b>	<b>1,02</b>	H2010	-1,37	-1,15	<b>0,42</b>	<b>0,89</b>
P1997	-1,20	-0,98	<b>0,85</b>	<b>1,64</b>	P2010	-1,37	-1,15	<b>0,45</b>	<b>0,98</b>
E1997	-1,22	-1,00	<b>0,99</b>	<b>2,06</b>	E2010	-1,34	-1,12	<b>0,40</b>	<b>0,89</b>
A1997	-1,37	-1,15	<b>0,85</b>	<b>1,89</b>	A2010	-1,42	-1,20	<b>0,22</b>	<b>0,69</b>