REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques

Filière : Sciences Agronomiques

Mémoire :

Présentée pour l'obtention du diplôme de Master II (LMD)

SPÉCIALITÉ : AMÉNAGEMENT HYDRO-AGRICOLE

Thème :

Évaluation spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique, à partir des séries hydrologiques dans le bassin versant de la Soummam

Présenté par :

- BENYOUCEF KHAOULA
- ALI LEMOUYES IMEN
- BENDJAMA AHMED

Membres de Jury:

Mr: SADOUNE Abdelaziz	(MAA)	**Président**	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Mr: DAIF Noureddine	(MAB)	**Examinateur**	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Mr: HEBAL Aziz	(Prof)	**Promoteur**	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Mm: METARAH Asma	(Doctorante)	**Co-Promoteur**	Université du Khemis Miliana

Année universitaire : 2025-2026

Résumé

La sécheresse constitue l'un des principaux risques climatiques affectant les ressources en eau, particulièrement dans les régions méditerranéennes. Le bassin versant de la Soummam est régulièrement confronté à ce phénomène dont les impacts se manifestent sur les précipitations et les écoulements de surface.

Cette étude vise à évaluer la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam à partir des séries de précipitations, de débits et des données climatiques. Les données exploitées comprennent les précipitations enregistrées dans cinq stations durant la période 1975–2020, une série de débits couvrant la période 1967–2020 ainsi que des données climatiques issues de la base NASA utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'analyse a été réalisée à l'aide des indices SPI, SPEI et SDI afin de caractériser les différentes phases de sécheresse. Les résultats montrent une période déficitaire persistante durant les années 1980, suivie d'un épisode de sécheresse sévère entre 1999 et 2002, avec une intensité maximale observée en 2002. Une phase de récupération est enregistrée entre 2003 et 2018 avant l'apparition d'un nouveau cycle sec à partir de 2019.

Cette étude met en évidence l'évolution de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam et souligne son influence sur les ressources en eau de la région.

Mots clés :

Sécheresse, bassin versant de la Soummam, SPI, SPEI, SDI, ETP, précipitations, débits.

Abstract

Drought is one of the major climatic hazards affecting water resources, especially in Mediterranean regions. The Soummam watershed is frequently exposed to this phenomenon, which impacts both precipitation and streamflow conditions.

This study aims to assess the spatio-temporal variability of drought in the Soummam watershed using precipitation, streamflow and climatic data. The dataset includes precipitation record from five stations for the period 1975–2020, streamflow data from one hydrometric station for 1967–2020, and climatic variables obtained from the NASA database for the estimation of potential evapotranspiration (PET).

Drought conditions were analyzed using SPI, SPEI and SDI indices. The results reveal a persistent dry period during the 1980s, followed by a severe drought episode between 1999

and 2002, with maximum intensity en 2002. A recovery phase was observed from 2003 to 2018, before the onset of a new drought cycle from 2019 onward.

The study highlights the evolution of drought in the Soummam watershed and its effects on regional water resources.

Keywords:

Drought, Soummam watershed, SPI, SPEI, SDI, PET, precipitation, streamflow.

الملخص:

يُعد الجفاف من أهم المخاطر المناخية التي تؤثر على الموارد المائية، خاصة في المناطق المتوسطية. ويُعتبر حوض وادي الصومام من المناطق التي تتعرض بشكل متكرر لهذه الظاهرة، مما يؤثر على التساقط والتدفقات المائية.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التباين الزماني والمكاني للجفاف في حوض وادي الصومام اعتمادًا على معطيات التساقط والتدفق والمعطيات المناخية. وقد شملت الدراسة بيانات التساقط لخمس محطات خلال الفترة 1975–2020، وبيانات التدفق لمحطة هيدرومترية واحدة خلال الفترة 1967–2020، إضافة إلى معطيات مناخية مستخرجة من قاعدة بيانات NASA استُعملت لحساب التبخر-النتح المحتمل.

تم تحليل الجفاف باستعمال مؤشرات

وأظهرت النتائج وجود فترة جفاف مستمرة خلال ثمانينيات القرن الماضي، تلتها موجة جفاف شديدة بين 1999 و2002 بلغت أقصاها سنة 2002، ثم مرحلة استرجاع بين 2003 و2018، قبل ظهور دورة جفاف جديدة ابتداءً من سنة 2019

تُبرز هذه الدراسة تطور ظاهرة الجفاف في حوض وادي الصومام وتأثيرها على الموارد المائية بالمنطقة

الكلمات المفتاحية:

الجفاف، حوض وادي الصومام،

، التبخر-النتح المحتمل، التساقط، التدفق المائي

Remerciements

Nous louons Allah, Le Tout-Puissant, en premier et en dernier lieu, pour les bienfaits qu'Il nous a accordés, notamment la santé, la patience et la persévérance tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant, le professeur Hebal Aziz, pour son encadrement, ses orientations et son accompagnement tout au long de ce travail. Nous le remercions également pour sa patience, ses conseils précieux et ses remarques pertinentes qui ont contribué à la réussite de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect et de notre grande reconnaissance.

Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements à Madame Matarah Asma pour son aide précieuse, sa disponibilité, ses orientations et ses conseils qui nous ont été d'une grande utilité tout au long de la réalisation de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude et de notre sincère reconnaissance.

Nous tenons à exprimer un remerciement tout particulier et très sincère à Monsieur Daif Noureddine pour son soutien constant, son aide précieuse et sa présence à nos côtés tout au long de ce travail. Nous prions Allah de le récompenser abondamment pour tout ce qu'il a fait pour nous.

Nous adressons aussi nos remerciements au Président du jury, Docteur Sadoune Abdelaziz pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce travail. Nous n'oublions pas de remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire, et qui n'ont ménagé aucun effort pour nous transmettre leur savoir et leurs connaissances.

Nous remercions également le Professeur Heddam Salim pour toutes les connaissances, les enseignements et les orientations scientifiques qu'il nous a transmis durant notre parcours universitaire, et qui ont grandement contribué à notre formation.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Prière finale

Ô Allah, fais de ce travail une œuvre sincère uniquement pour Ta face noble. Bénis-le et fais-en une source de science utile et bénéfique. Fais que notre fatigue en soit une preuve en notre faveur et non contre nous. Accorde-nous la réussite dans ce bas monde et dans l'au-delà, et guide-nous vers ce que Tu aimes et agrées.

Pardonne-nous, à nos parents, à nos enseignants et à tous ceux qui nous ont aidés, et récompense généreusement tous ceux qui nous ont soutenus. Amîn, ô Seigneur des mondes.

Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits, pour Sa miséricorde et pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires afin de mener ce travail à son terme. À Lui reviennent toute louange, toute reconnaissance et toute gratitude.

Je dédie également ce travail à moi-même, en reconnaissance des efforts consentis, des difficultés surmontées et de la détermination dont j'ai fait preuve tout au long de ce parcours. Cette réalisation est le fruit de nombreuses années de travail, de patience et de persévérance. À ma très chère mère, source inépuisable d'amour, de tendresse et de sacrifice. Merci pour ton soutien indéfectible, tes encouragements, tes prières et tous les efforts que tu as consentis pour mon bonheur et ma réussite. Qu'Allah te protège, te comble de Ses bienfaits et te récompense abondamment.

À mes chers frères et sœurs : Akram, Rami, Manal et Ikram, pour leur affection, leur présence et leur soutien tout au long de mon parcours.

À mes binômes, Ben Djamaa Ahmed et Ali Lemouyes Imane, avec qui j'ai partagé les efforts, les défis et les moments marquants de cette aventure académique. Merci pour votre collaboration, votre sérieux et les souvenirs que nous avons construits ensemble. Je vous souhaite beaucoup de réussite et d'épanouissement dans votre avenir.
À mes précieux petits amis, qui ont apporté de la joie et de la lumière à mon quotidien, avec une pensée toute particulière pour Chihab et Raghad.

À mon ami (A. Ar), mon premier soutien et l'une des personnes qui ont le plus contribué à me donner la force d'avancer. Merci pour ta présence constante, ton écoute, tes encouragements et ton soutien sans faille. Tu as été à mes côtés dans les moments les plus difficiles comme dans les plus heureux. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de ma sincère gratitude.

Enfin, je dédie ce travail à tous les enseignants que j'ai eu l'honneur de rencontrer tout au long de mon parcours scolaire et universitaire. Merci pour le savoir transmis, les conseils prodigués et les valeurs que vous nous avez inculquées.

À toutes les personnes qui ont cru en moi, m'ont soutenue et encouragée de près ou de loin, je dédie humblement ce travail.

Avec toute ma gratitude et mon affection.

KHAOULA

❤❤ *Dédicace* ❤❤

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma gratitude :

À mes chers parents (Maman et Papa) : Aucune dédicace ne saurait exprimer mon profond amour et mon immense respect. Merci pour vos sacrifices, votre soutien inconditionnel et vos prières qui ont éclairé mon chemin. Que Dieu vous préserve et vous accorde une longue vie.

À mes frères et ma sœur : Pour votre présence, vos encouragements constants et l'amour que vous me portez. Vous êtes mon repère et ma force.

À mes grands-parents (Ma grand-mère et Mon grand-père) : Les piliers de notre famille. Merci pour vos douces prières et votre amour bienveillant qui m'ont toujours protégé(e). À mes chères tantes (Mes tantes maternelles) : Pour votre affection, votre bienveillance et votre soutien tout au long de mon parcours.

À ma chère amie KHAOULA : Ma compagne de route, pour ton soutien infaillible, tes encouragements dans les moments les plus difficiles et ta précieuse amitié.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et à ma réussite. Merci du fond du cœur.

❤❤ *IMEN* ❤❤

Dédicace

Avant tout, je remercie Allah, Le Tout-Puissant, pour Sa grâce, Sa miséricorde et pour m'avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires afin d'achever ce travail. À Lui reviennent toute louange et toute gratitude.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, qui ont toujours été ma plus grande source de soutien et de motivation.

À mon père, pour tous les sacrifices consentis, pour son soutien indéfectible et pour les valeurs qu'il m'a transmises. Que Dieu le préserve et le récompense pour tout ce qu'il a fait pour moi.

À ma mère, pour son amour infini, sa tendresse, ses prières et sa présence constante à mes côtés. Aucun mot ne saurait exprimer ma reconnaissance pour tout ce qu'elle représente dans ma vie. Que Dieu la protège et lui accorde santé, bonheur et longue vie.

À ma famille, pour son affection, ses encouragements et son soutien tout au long de mon parcours.

À mon binôme, Khaoula pour sa collaboration, son sérieux, sa patience et tous les efforts fournis durant la réalisation de ce travail. Merci pour les moments de partage, d'entraide et de persévérance qui nous ont permis d'atteindre cet objectif.

À mes amis et à toutes les personnes qui m'ont soutenu, encouragé et accompagné de près ou de loin durant cette étape importante de ma vie.

Enfin, je dédie ce travail à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et à mon épanouissement académique.

À tous ceux qui ont cru en moi, je dédie humblement ce travail avec respect et gratitude

AHMED

SOMMAIRE

Liste des figures VII
Liste des tableaux X
Liste des abréviations XII
Introduction générale 01

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction 05
1. la sécheresse générale……..…..05
1.1. Définitions 05
1.2. Les types de la sécheresse……..……06
1.2.1. La sécheresse météorologique…….06
1.2.2. La sécheresse agricole…….06
1.2.3. La sécheresse hydrologique……..…06
1.2.4. La sécheresse socioéconomique……...…06
1.3. Relations entre les différents types de sécheresse……07
1.4. Les indices de la sécheresse…….....07
1.4.1. Les indices météorologiques……08
1.4.2. Les indice d'humidité du sol……...…08
1.4.3. Les indices hydrologiques……09
1.4.4. Les indice de télédétection…….…09
2. La sécheresse hydrologique……...10
2.1. Définition……10
2.2. Cycle hydrologique de l'eau……..…..10
2.3. Éléments du cycle de l'eau……..11

2.4. Les cause de la sécheresse selon la FAO……..……..……...…11

2.5. Les conséquences de la sécheresse……..……12

2.5.1. Impact sur l'agriculture ...……12

2.5.2. Santé publique ……..…12

2.5.3. Tensions sociales ……..…12

2.5.4. Migration ……12

2.5.5. Problèmes avec la biodiversité ……12

2.5.6. Énergie ……..…12

2.5.7. Industrie ……...… 12

2.5.8. Écosystèmes ……12

Conclusion……..……...…12

Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude

Introduction……...…15

2.1. Définitions…….……..…15

2.1.1. Définition du bassin versant……15

2.1.2. Définition du bassin versant de la Soummam…….15

2.2. Situation géographique……...…16

2.3. Les caractéristiques des sous bassins versants de la Soummam……19

2.3.1. Les caractéristiques morphométries……19

2.3.1.1. La surface…….19

2.3.1.2. Le périmètre…….19

2.3.2. Les caractéristiques de forme……..19

2.3.2.1. Indice de forme de gravelius……19

2.3.2.2. Le rectangle équivalent……20

2.3.3. Les caractéristiques d'altitudes……..……..21

2.3.3.1. Altitude maximale et minimale……21

2.3.3.2. Altitude moyenne……..…21

2.4. Situation climatique……...……23

2.5. Géologie…….24

2.6. Les sols……...26

2.7. Réseau hydrographique du bassin de la Soummam……...……27

2.8. Ressources hydriques du bassin de la Soummam……..……27

2.8.1. Les eaux de surface……..…27

2.8.2. Les eaux souterraines……..……27

Conclusion……28

Chapitre 03 : Présentation et traitement de données

Introduction……...……30

3.1. Collecte des données……..……30

3.1.1. Données pluviométriques……30

3.1.2. Données climatiques..……..…31

3.1.3. Données hydrométriques…….....31

3.2. Présentation des données utilisées……..…32

3.2.1. Acquisition des données hydro climatiques……32

3.2.2. Traitement et préparation des données…… 33

3.2.3. Présentation des stations de mesure utilisées……34

3.2.4. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)……...…35

3.2.4.1. Principe général……35

3.2.4.2. Méthode de calcul……36

3.3. Analyse statistique descriptive des données……..39

Conclusion……43

Chapitre 04 : Matériels et méthodes

Introduction……...……45

4.1. Présentation des données et matériels utilisés…….....45

4.1.1. Données utilisées……...…45

- Données de précipitations…….…45
- Données climatiques utilisées pour le calcul de l'ETP…….…45
- Données de débit hydrologique……46
- Période d'étude……46
- Présentation des stations utilisées……46

4.1.2. Outils et logiciels utilisés……...….47

- Microsoft Excel…….....47
- Python……..48
- QGIS……48

4.2. Démarche méthodologique de l'étude……...…48

4.2.1. Préparation et traitement des données…….49

4.2.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ……..50

4.2.3. Calcul des indices de sécheresse…….51

4.3. Méthodes de calcul des indices de sécheresse……...51

4.3.1. L'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)…….... 52

- Définition…….52
- Principe de calcul……..52
- Les avantages de la méthode SPI……..53
- Les inconvénients de la méthode SPI…….53
- Interprétation du SPI pour une période plus ou moins longue……..… 53

A. Indice SPI sur 1 mois……..53

B. Indice SPI sur 3 mois……...…54

C. Indice SPI sur 6 mois……..54

D. Indice SPI sur 12 mois……..….55

4.3.2. L'Indice Standardisé des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (SPEI)....55

- Définition……..55
- Principe de calcul……..……56
- Les avantages de la méthode SPEI……..…….57
- Les inconvénients de la méthode SPEI…….57
- Interprétation du SPEI selon les échelles temporelles……..57

A. SPEI sur 1 mois……57

B. SPEI sur 3 mois……...….57

C. SPEI sur 6 mois……58

D. SPEI sur 12 mois……..58

4.3.3. Streamflow Drought Index (SDI)……58

- Définition……..……58
- Principe de calcul……..…59

1. Volume cumulé d'écoulement……...59

2. Calcul du SDI……59

- Les avantages de la méthode SDI…….…60
- Les inconvénients de la méthode SDI……..…..…61
- Interprétation du SDI selon les échelles temporelles……61

A. SDI sur 1 mois…….…….61

B. SDI sur 3 mois……...……61

C. SDI sur 6 mois……...……61

D. SDI sur 12 mois…….……61

4.4. Méthode d'analyse spatio-temporelle……61

4.4.1. Comparaison entre les stations……62

4.4.2. Analyse de l'évolution temporelle de la sécheresse……62

4.4.3. Identification des périodes critiques……62

Conclusion……62

Chapitre 05 : Analyse et discussion

Introduction…….….65

5.1. Analyse, caractérisation et synthèse des résultats de l'indice (SPI)……..…...65

5.1.1. Résultats et interprétation détaillée de indice SPI (station 150101)……67
5.1.2. Résultats et interprétation détaillée de indice SPI (station 150103)……79
5.1.3 Résultats et interprétation détaillée de indice SPI (station 150201)……72
5.1.4. Résultats et interprétation détaillée de indice SPI (station 150204)……75
5.1.5. Résultats et interprétation détaillée de indice SPI (station 150208)……76

5.2. Analyse, caractérisation et synthèse des résultats de l'indice (SPEI)……78
5.2.1. Résultats et interprétation détaillée de indice SPEI (station 150101)……..…76
5.2.2. Résultats et interprétation de la station 105103 (SPEI)……...…78
5.2.3. Résultats et interprétation de la station 150201 (SPEI)……...……79
5.2.4. Résultats et interprétation de la station 150204 (SPEI)……...…80
5.2.5. Résultats et interprétation de la station 150208 (SPEI)……...82

5.3. Analyse, caractérisation et synthèse des résultats de la reconnaissance Drought Index (SDI)……..…..…...……84
5.3.1. Résultats et interprétation de la station 150204 (SDI)……88

5.4. Interprétation Générale des Résultats….....……90
5.4.1. Validation Statistique et Normalisation des Indices……...…91
5.4.2. Dynamique de la Sécheresse Climatique et Agricole……..…91
5.4.3. Réponse du Système Hydrologique et Phénomène de Décalage (Time-lag)…..93

5.5. Synthèse Chronologique des Grands Cycles Climatiques……93
Conclusion……95

Conclusion générale……...…96
Références bibliographiques…….……99

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01

Figure 1.1 : Succession de situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse……05

Figure 1.2. Relations entre les différents types de sécheresse-DMNC, USA (OSS, 2013)….07

Figure 2.1 : Composantes principales et secondaires du cycle de l'eau……..…..……11

CHAPITRE 02

Figure 2.1. Délimitation de bassin versant de la Soummam ; source : Réalisation personnelle à Partir du logiciel QGIS……16

Figure 2.2. Carte de situation géographique de bassin versant de la Soummam ; Source : Données STRM (USGS), traitées sous QGIS……18

Figure 2.3. Forme allongée du sous bassin l'Oued Soummam ; Source : Image satellite Google Earth et délimitation du bassin versant réalisée sous QGIS……20

Figure 2.4. Courbe hypsométrique de le SBV Soummam ; Source : Bentoumi et Hammou, 2021……22

Figure 2.5. Carte hypsométrique de la SBV de Soummam ; Source : MNT+ bases de données duministère des ressources en eau……22

Figure 2.6. La carte des régions bioclimatique du bassin de la Soummam ; Source : extraite de La carte des régions bioclimatiques du nord de l'Algérie par Gharifi, 2003……24

Figure 2.7. Carte géologique du bassin versant de la Soummam ; Source : extraite de la carte Géologique de l'Algérie par Gharifi, 2003……25

Figure 2.8. Carte des sols du bassin versant de la Soummam ; Source : extraite de la carte des Sols de l'Algérie faite par J. Durand en 1954, (charifi S, 2003)……26

Figure 2.9. Carte des ressources hydriques du bassin versant de la Soummam ; Source : Meddi, M. amp ; Boutaghane, H. - Étude des ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam(Algérie). Revue des Sciences d'Eau,2013/2014……27

CHAPITRE 03

Figure 3.1. Schéma méthodologique de collecte et de traitement des données.....38

Figure 3.2. Diagrammes en boîte (Boxplots) des précipitations, de l'ETP et du débit observé 40

Figure 3.3. Diagrammes de violon (Violin plots) des précipitations, de l'ETP et du débit observé.....41

Figure 3.4. Variation temporelle des précipitations, de l'ETP et du débit observé durant la période d'étude….....42

CHAPITRE 04

Figure 4.1. Localisation des stations météorologiques et hydrométriques dans le bassin versant de la Soummam.....47

Figure 4.2. Démarche méthodologique de l'étude……..49

CHAPITRE 05

Figure 5.1. Évolution temporelle des indices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 au niveau de la station 150101……..……67

Figure 5.2. Évolution temporelle des indices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 au niveau de la station 150103…….……..68

Figure 5.3. Évolution temporelle des indices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 au niveau de la station 150201……..69

Figure 5.4. Évolution temporelle des indices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 au niveau de la station 150204……..70

Figure 5.5. Évolution temporelle des indices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 au niveau de la station 150208……73

Figure 5. 6: Évolution temporelle des indices SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150101……77

Figure 5. 7: Évolution temporelle des indices SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150103……79

Figure 5.8 : Évolution temporelle des indices SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150201……..……..80

Figure 5.9 : Évolution temporelle des indices SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150204……81

Figure 5.10 : Évolution temporelle des indices SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150208……..……82

Figure 5.11. Variations de la moyenne annuelle de l'indice SDI (1, 3,6 et 12 moins) dans la station hydrométrique 150204……..……84

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 01

Tableau 1.1. Indices de type météorologique…….….08

Tableau 1.2. Indices du type humidité du sol…….….09

Tableau 1.3 : Indices de type hydrologique……..……..09

Tableau 1.4 : Indices de type télédétection…….10

Tableau 2.1 : Éléments du cycle de l'eau……11

CHAPITRE 02

Tableau2.1. Hypsométrie du SBV de la Soummam ; Source : Bentoumi et Hammou, 2021.....23

CHAPITRE 03

Tableau 3.1. Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées dans cette étude……35

Tableau 3.2. Caractéristiques statistique descriptive des données exploitées……..…...….39

CHAPITRE 04

Tableau 4.1. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SPI…….…53

Tableau 4.2. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SPEI……..56

Tableau 4.3. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SDI……60

CHAPITRE 05

Tableau 5.1. Synthèse des caractéristiques (SPI) au niveau des stations d'étude……...……66

Tableau 5.2 : Synthèse des caractéristiques de l'indice (SPEI) au niveau des stations d'étude…….....79

Tableau 5.3. Synthèse des caractéristiques de la sécheresse hydrologique (SDI) au niveau de station150204……91

Tableau 5.4. Caractérisation hydro-climatique globale du bassin versant de la Soummam…95

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANRH Agence Nationale des Ressources Hydraulique

ETP Evapotranspiration Potentielle

FAO Food Alimentaire Organisation

OMM Organisation Météorologique Mondiale

ONM Office Nationale de la Métrologie

SPI Indice de Précipitation Standardisé

SPEI Standardized Précipitation Evapotranspiration Index

SDI Streamflow drought Index

NASA National Aeronautics and Space Administration

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La sécheresse constitue l'un des phénomènes climatiques les plus complexes et les plus préoccupants à l'échelle mondiale. Son intensification au cours des dernières décennies, sous l'effet des changements climatiques et de l'augmentation des pressions anthropiques sur les ressources naturelles, représente un défi majeur pour les écosystèmes et les sociétés humaines.

Contrairement à d'autres phénomènes extrêmes, la sécheresse s'installe progressivement et peut persister sur de longues périodes, engendrant des répercussions considérables sur les ressources en eau, l'agriculture, l'économie ainsi que l'environnement.

Dans les régions méditerranéennes et particulièrement au Maghreb, la rareté des ressources hydriques est devenue une problématique préoccupante en raison de la variabilité climatique marquée, de l'irrégularité des précipitations et de l'augmentation continue des besoins en eau. L'Algérie, caractérisée par un climat allant du semi-aride à l'aride sur une grande partie de son territoire, demeure particulièrement vulnérable aux épisodes de sécheresse. Ces derniers se traduisent souvent par une diminution significative des précipitations, une baisse des écoulements de surface et une réduction de la disponibilité des ressources hydriques, compromettant ainsi plusieurs secteurs socio-économiques.

Parmi les différentes formes de sécheresse ; la sécheresse hydrologique occupe une place importante en raison de ses impacts directs sur les débits des cours d'eau, les réserves superficielles et souterraines ainsi que les infrastructures hydrauliques. Son évaluation nécessite le recours à des outils et indices permettant de caractériser sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

À cet effet, les indices de sécheresse tels que le Standardized Précipitation Index (SPI) et le Standardized Précipitation Evapotranspiration Index (SPEI), et le Streamflow drought Index (SDI), constituent des outils largement utilisés pour analyser les épisodes de sécheresse, identifier leurs intensités, leurs durées et leurs fréquences.

Le bassin versant de la Soummam, situé au nord-est de l'Algérie, représente une région d'intérêt hydrologique et socio-économique importante. Cependant, ce bassin est soumis à une variabilité climatique notable et à des pressions croissantes sur les ressources en eau, ce qui accentue sa vulnérabilité face aux épisodes de sécheresse. Dans ce contexte, une évaluation spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique s'avère indispensable afin de mieux

Comprendre son évolution et ses manifestations dans cette région.

Le présent travail a pour objectif principal d'évaluer la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam à travers l'utilisation des indices SPI et SPEI et SDI. Cette étude vise à identifier les périodes sèches, analyser leur intensité et leur répartition spatiale, ainsi qu'à interpréter les dynamiques temporelles observées à partir des données hydro-climatiques disponibles.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre présente le cadre théorique relatif à la sécheresse et aux concepts fondamentaux associés. Le deuxième chapitre est dédié à la présentation de la zone d'étude, à savoir le bassin versant de la Soummam, à travers ses caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques. Le troisième chapitre porte sur le traitement des données hydro climatiques utilisées dans cette étude. Le quatrième chapitre présente les matériaux et la méthodologie adoptée, notamment les approches utilisées pour l'évaluation de la sécheresse à l'aide des indices SPI et SPEI et SDI. Enfin, le cinquième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse, l'interprétation et la discussion des résultats obtenus.

Et on termine ce modeste travail par une conclusion générales et des perspectives.

Chapitre 01
Recherche bibliographique

Introduction

Ce chapitre présente le cadre théorique de l'étude, il vise à définir ; la notion de sécheresse, ses différents types, ses causes et ses impacts, ainsi que les principaux indices utilisés pour son évaluation notamment le SPI, le SDI et SPEI.

1. la sécheresse générale

1.1. Définitions

La sécheresse, est un phénomène naturel caractérisé par un déficit prolongé des précipitations par rapport aux normales climatiques. Contrairement à d'autres aléas naturels, elle se distingue par une évolution lente et progressive. Ce déficit pluviométrique entraîne, avec un certain décalage dans le temps, une diminution des ressources en eau disponibles, notamment une baisse du débit des cours d'eau, une réduction du niveau des réservoirs ainsi qu'un abaissement de la nappe phréatique.

En raison de cette évolution progressive, les effets de la sécheresse peuvent mettre plusieurs semaines, voire plusieurs mois, à se manifester pleinement. Ainsi, la sécheresse est considérée comme un phénomène complexe dont les impacts varient selon sa durée, son intensité et les conditions climatiques et hydrologiques locales.

[OMM (2006). DROUGHT monitoring and EARLY warning…..]

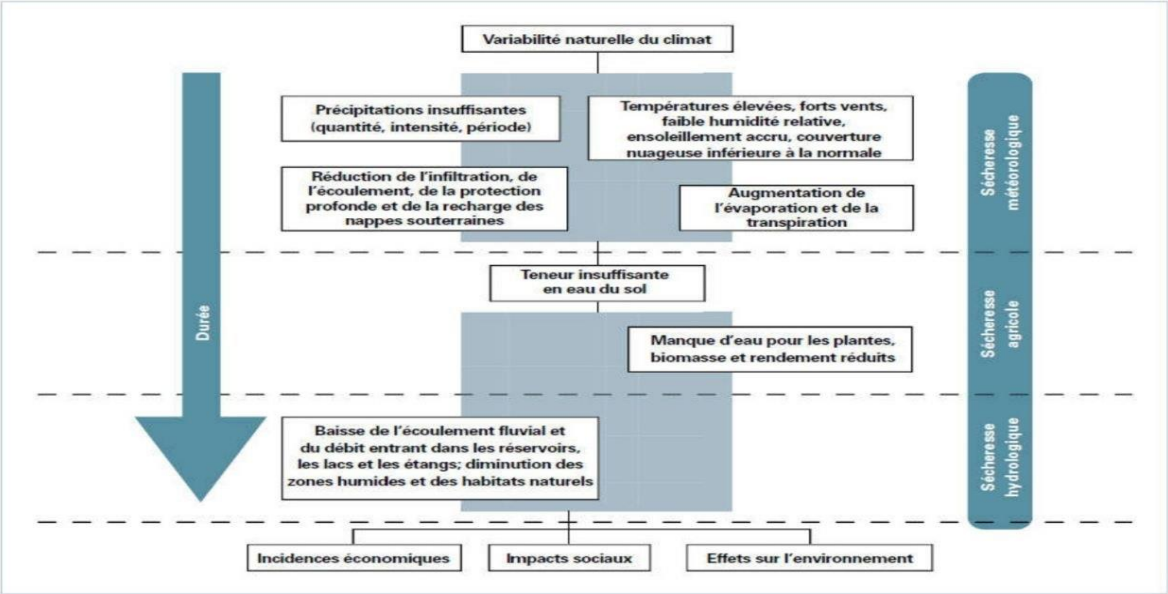


Figure 1.1 : Succession de situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse

1.2. Les types de la sécheresse

1.2.1. La sécheresse météorologique

La sècheresse météorologique, correspond à un déficit de précipitation par rapport à la normale sur une période donnée. Elle est définie, à partir de seuils (par exemple 75% de la normale) et d'une durée spécifique (souvent plusieurs mois), ces seuils et cette durée variant selon les régions. Son évaluation repose sur des indicateurs, tels que l'écart des précipitations par rapport à la normale, les déciles et l'indice de précipitation standardisé (SPI). Il s'agit d'un phénomène naturel dont les causes variant d'une région à une autre.

1.2.2. La sécheresse agricole

La sécheresse agricole, correspond à un déficit en eau dans le sol qui affecte la croissance et le développement des cultures. Elle dépend du déficit des précipitations, mais aussi de la nature du sol et de l'intensité de ces dernières.

Les sols ont des caractéristiques variables ; certains présentent une faible capacité de rétention d'eau, ce qui les rend plus vulnérables à ce type de sécheresse. Ainsi, la quantité de précipitation ne détermine pas directement l'eau disponible pour les plantes.

1.2.3. La sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique, correspond à une diminution des ressources en eau de surface et souterraines (rivières, lacs, aquifères) par rapport à la normale.

1.2.4. La sécheresse socioéconomique

La sécheresse socioéconomique, se distingue par le fait qu'elle résulte de l'interaction entre l'offre et la demande de ressources dépendant des précipitations (eau, fourrage, énergie hydroélectrique, etc…). L'offre varie avec les précipitations et les réserves en eau, tandis que la demande est influencée par la population, le développement ou d'autres facteurs économiques. Les sécheresses ; agricole, hydrologique et socioéconomique, suivent généralement la sécheresse météorologique, car leurs effets apparaissent avec un décalage lié à l'épuisement des sols et des ressources en eau.

Une sécheresse prolongée réduit l'humidité du sol, le débit des cours d'eau et le niveau des nappes, augmentent ainsi la demande en eau et entraînent des conséquences socioéconomiques. La gestion des systèmes d'approvisionnement, peut adapter à l'usage de variétés résistantes à la sécheresse.

1.3. Relations entre les différents types de sécheresse

Les différents types de sécheresse, sont étroitement liés mais présentent des relations complexes et décalées dans le temps. La sécheresse météorologique, liée au déficit de précipitation, constitue le point de départ. Elle est suivie par la sécheresse agricole, qui apparaît rapidement en raison de la dépendance des cultures à l'humidité du sol. Si le déficit pluviométrique persiste, la sécheresse hydrologique se manifeste à travers la diminution des débits des cours d'eau, des niveaux des lacs et des nappes souterraines. Enfin, en cas de persistance prolongée, les impacts se généralisent et donnent lieu á une sécheresse socioéconomique, résultant de la combinaison des différents types et de leurs effets sur les activités humaines. Ainsi, le facteur temps joue un rôle déterminant dans l'évolution et l'interaction entre ces formes de sécheresse.

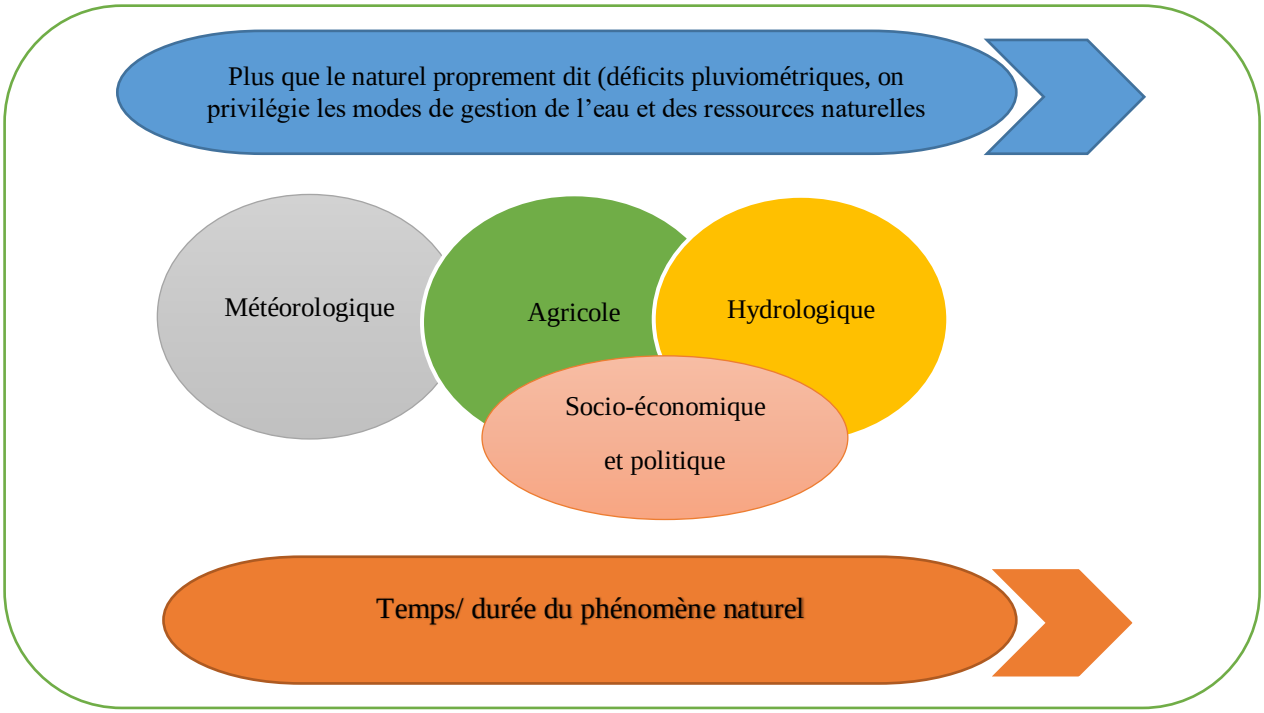


Figure 1.2. Relations entre les différents types de sécheresse-DMNC, USA (OSS, 2013)

1.4. Les indices de la sécheresse

Les indices sont des valeurs numériques calculées à partir de paramètres climatiques ou hydrométéorologiques, pour mesurer la gravité de la sécheresse.

Les indices permettant de déterminer l'intensité, l'emplacement, la période d'apparition et la durée d'un épisode de sécheresse, en utilisant un seuil d'intensité pour délimiter le début et la fin de l'événement.

Ces outils sont essentiels pour la gestion des risques, la mise en place de systèmes d'alerte, et la validation de modèles, en tenant compte du climat local et de vulnérabilité des zones touchées. Ils se classant en quatre catégories : météorologique, humidité du sol, hydrologique et télédétection.

1.4.1. Les indices météorologiques

Sont des outils utilisant principalement des mesures recueillies dans les stations météorologiques, telles que la précipitation, la température, l'évaporation, etc…

Ces valeurs sont comparées aux anciennes valeurs pour analyser les variations climatiques.

Ces indices sont appréciés pour leur simplicité, rapidité et facilité d'utilisation. Le tableau 1.1, donne quelques indices météorologiques utilisés fréquemment dans la littérature.

Tableau 1.1. Indices de type météorologique

Indices	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
AAI Indice d'Aridité Anormale	P, T, ETP, ET	Indices en temps réel fondé sur le bilan hydrique
KBDI Indice de sécheresse de Keetch-Bayram	P, T	Calculs fondés sur le climat de la zone visée
AI Indice d'Aridité	P, T	Peut aussi sévir à la classification des climats
SPI Indice de Précipitation normalisée	P	Recommandé par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
SPEI Indice de Précipitations et l'Evapotranspiration Normalisée	P, ETP	Séries de données complètes requises ; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
SC-PDSI Indice de sécheresse de palmer auto-étalonné	P, T, TED	Nécessité d'avoir des séries de données complètes

Légende :
P= précipitations. T= température. ET= évapotranspiration réelle.
TED= teneur en eau disponible. ETP= évapotranspiration potentielle.

1.4.2. Les indices d'humidité du sol

Quelques indices du type d'humidité du sol sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 1.2. Indices du type humidité du sol

Indices	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
SMA Anomalie d'humidité du sol	P, T, TED	Destiné à améliorer le bilan hydrique du PDSI
SWS Stockage d'eau dans le sol	TED, RS, TS, DHS	Interpolation difficile sur de vastes étendues en raison des variations du type de sol et de culture

Légende :
TED= teneur en eau disponible. P= précipitations.
TS= type de sol. RS= réservoir.
DHS= déficit hydrique du sol. T= température.

1.4.3. Les indices hydrologiques

Quelques indices de type hydrologique sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 1.3 : Indices de type hydrologique

Indices	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
PHDI Indice de sécheresse hydrologique de palmer jaune	P, T, TED	Séries de données requises
SDI Indice de sécheresse fonde sur l'écoulement fluvial	EF	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur l'écoulement
SRSI Indice d'alimentation des réservoirs normalise	RS	Calculs similaires à ceux du SPI avec des données sur les réservoirs

Légende :
TED= teneur en eau disponible. EF= écoulement fluvial.
RS= réservoirs. P= précipitations. T= température.

1.4.4. Les indices de télédétection

Dans le domaine de la télédétection, de nombreux chercheurs ont examiné la possibilité d'évaluer et suivre la sécheresse en utilisant soit la réflexion, soit les données thermiques ou des réponses combinées provenant du capteur AVHRR (Advanced VERY High Résolution Radiométer), à bord du satellite NOAA (National Océanique and Atmosphérique Administration). Quelques indices de type télédétection sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 1.4 : Indices de type télédétection

Indices	Paramètres d'entrée	Informations complémentaires
ESI- indices de stress fonde sur l'évaporation	SAT, PET	N'est utilisé en exploitation que depuis peu
NDVI- indices de végétation par différence normalise	SAT	Calcule pour la plupart des emplacements
TCI- indices des conditions de température	SAT	Généralement présente avec les calculs du NDVI

Légende :
SAT= satellite PET= évapotranspiration

2. La sécheresse hydrologique

2.1. Définition

La sécheresse hydrologique correspond à une diminution des ressources en eau de surface et souterraine (lacs, rivières, réservoirs et aquifères), par rapport aux conditions moyennes. Elle est moins directement liée au déficit de précipitation, car il n'existe pas de relation immédiate entre les pluies et le niveau des ressources hydriques. Un décalage temporel important peut exister entre le manque de précipitations et ses effets sur le système hydrologique.

Le retour à la normale est généralement lent, en raison de la durée de recharge des réserves en eau.

Ces ressources sont utilisées pour plusieurs usages (irrigation, énergie, consommation, etc...), ce qui influence leur disponibilité.

2.2. Cycle hydrologique de l'eau

Le cycle hydrologique de l'eau est un processus dynamique qui décrit le mouvement de l'eau à travers différents réservoirs naturels situés dans l'atmosphère, les mers, les océans et les continents. L'eau existe principalement sous trois phases physiques : liquide, solide (glace, neige) et gazeuse (vapeur d'eau). Elle circule facilement entre ces phases et espaces, rendant le cycle hydrologique complexe et variable dans le temps et l'espace.

Selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM, 2008), ce système peut être représenté par une multitude de réservoirs (ou stocks) dans lesquels l'eau est stockée, ainsi que par les flux (ou échanges) qui transportent l'eau d'un réservoir à un autre. Ces flux incluent

Notamment l'évaporation, la condensation, les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration.

En résumé, le cycle hydrologique est une représentation intégrée de la circulation de l'eau à l'échelle de la planète, essentielle pour la régulation du climat, des écosystèmes et des ressources en eau douce accessibles à l'homme.

2.3. Éléments du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est composé de quatre (04) éléments, comme il est indiqué sur le tableau 01 ci-dessous.

Tableau 2.1 : Éléments du cycle de l'eau

Éléments du cycle	Précipitations	Ruissellement	Évapotranspiration	Infiltration
Source d'énergie	Atmosphère	Gravité	Atmosphère (radiation, advection)	Rétention hydrique (capillarité, adsorption)
Facteurs du milieu	Topographie	Topographie, morphologie, couvert végétal…	Climat, stade végétatif,….	Texture et structure (surface, sol, sous-sol), …

Source : BEDDAL, 2015

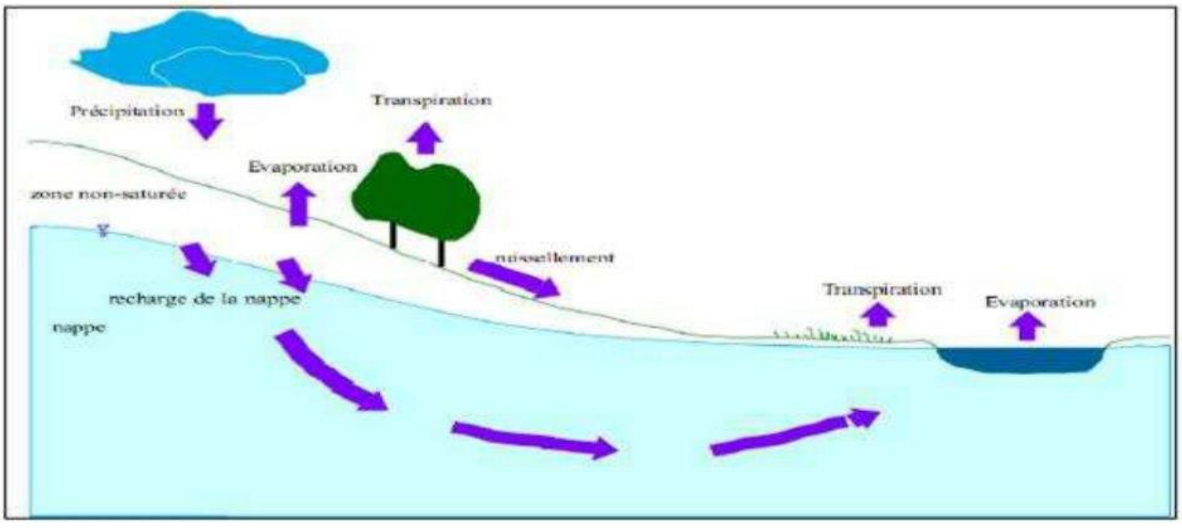


Figure 2.1 : Composantes principales et secondaires du cycle de l'eau

2.4. Les causes de la sécheresse selon la FAO

Selon la FAO, les causes principales de la sécheresse hydrologique, sont :

- Le changement climatique, causant une augmentation des températures et une réduction des précipitations, est la principale cause des sécheresses hydrologiques.
- La dégradation des sols, touchant 70 % des terres arides ainsi que la surexploitation des ressources en eau, intensifient les impacts de la sécheresse hydrologique.

La FAO souligne l'importance de passer d'une gestion de crise à une approche proactive, intégrant la prévision et la résilience pour sécuriser l'alimentation. Cette dernière, peut être réduire l'impact des sécheresses puisque ; la gestion de crise réagit après l'événement, tandis que la gestion proactive inclut la prévision, la planification et le renforcement de la résilience pour prévenir et atténuer les sécheresses.

2.5. Les conséquences de la sécheresse

La sécheresse hydrologique, peut influer sur les aspects essentiellement suivant :

- **Impact sur l'agriculture** : Manque d'eau pour les cultures vivrières, réduction du rendement des cultures et prairies.
- **Santé publique** : Augmentation des disettes, des famines et des épidémies dues à la malnutrition.
- **Tensions sociales** : Troubles sociaux et conflits liés à la lutte pour les ressources naturelles comme l'eau et la nourriture.
- **Migration** : Déplacement de populations et hausse du nombre de réfugiés climatiques.
- **Problèmes avec la biodiversité** : Invasions d'espèces ou autres déséquilibres écologiques.
- **Énergie** : Diminution de la production d'électricité.
- **Industrie** : Pénurie d'eau pour les activités industrielles.
- **Écosystèmes** : Modifications, perturbations voire destructions notamment dans les zones humides.

Conclusion

La sécheresse est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction de plusieurs facteurs climatiques et hydrologiques. Elle se manifeste sous différentes formes (météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique), étroitement liées entre elles, et peut être évaluée à l'aide de plusieurs indices adaptés aux séries de données disponibles.

Ses impacts touchent divers secteurs, notamment les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes. Ainsi, l'étude de la sécheresse hydrologique nécessite une approche spatio-temporelle basée sur des données fiables et une bonne compréhension du cycle hydrologique.

Dans ce contexte, il est essentiel de situer l'analyse dans un cadre géographique précis. C'est pourquoi le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la zone d'étude, à savoir le bassin versant de la Soummam, en mettant en évidence ses caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques.

Chapitre 02 :

Présentation de la zone d'étude

Introduction

Le Nord de l'Algérie subit de plein fouet les répercussions des changements climatiques globaux, qui se manifestent essentiellement par la récurrence et l'intensification des phénomènes de sécheresse. Ce stress hydrique majeur perturbe gravement le bilan hydrique naturel, entraînant une baisse des précipitations, une hausse de l'évapotranspiration et une réduction critique du débit des cours d'eau. Dans ce contexte, l'étude hydrologique devient indispensable pour comprendre comment le milieu physique réagit face au déficit en eau. C'est pourquoi ce deuxième chapitre est dédié à l'analyse des facteurs naturels et climatiques de la zone d'étude. Nous examinerons sa situation géographique, ses paramètres climatiques, la nature de ses sols, son couvert végétal et son réseau hydrographique, afin de poser les bases scientifiques nécessaires à l'évaluation du risque de sécheresse.

2.1. Définitions

2.1.1. Définition du bassin versant

Un bassin de natation plat est une zone géographique précise : il correspond à un ensemble de surfaces qui reçoivent l'eau qui circule naturellement le long d'un même cours d'eau ou dans la partie inférieure de l'eau. Les lignes de partage des eaux entre les différents bassins sont définies. Ces lignes sont des frontières naturelles formées par le relief : elles coïncident avec des lignes de roches. Des canalisations d'eau sont creusées dans le cours d'eau ou dans une autre ligne d'approvisionnement en eau entre deux bassins le long du littoral. Une image de petites poupées ; le bassin opposé à une rivière est créé par un ensemble de petits bassins qui se déversent de leurs ressources. Le bassin diversifié se compose d'un cycle principal de l'eau qui prend de la source plus puissante à des hauteurs élevées, à l'endroit que l'on appelle "tête de bassin". Sur son chemin, le cours d'eau collecte l'eau provenant de tous les points du bassin versant : l'eau de ses rivières affluentes, l'eau de la pluie, les eaux des glaciers, et les eaux de surface d'origine. Le courant principal de l'eau s'écoule du bas de la vallée vers la mer ou suit un chemin à travers le lit de la rivière. Alors que le bassin génère principalement des phénomènes d'érosion et d'effondrement, dans les zones plus calmes, les particules se déposent : c'est ce qu'on appelle le dépôt. Chaque bassin est unique en termes de forme, d'orientation, de densité du réseau hydrographique, de topographie, d'ensoleillement, d'occupation du sol (cultures, arbres, forêts, réserves d'eau...) et de climat, sans oublier l'urbanisation et les activités humaines

2.1.2. Définition de bassin versant de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam est un grand bassin hydrographique situé au nord-est de l'Algérie, d'une superficie d'environ 9055 km². Il est limité par plusieurs chaînes montagneuses (Djurdjura, Bibans, Petite Kabylie…) et comprend des plateaux ainsi que la vallée de la Soummam, Il se caractérise par une grande diversité de reliefs et de climats, allant de zones semi-arides à des zones humides méditerranéennes. Le bassin est divisé en plusieurs sous-bassins, dont les principaux sont Oued Sahel, Oued Bousselam et Oued Soummam, et il contient des barrages importants comme Tilesdit, Ain Zada et Tichy-Haf.

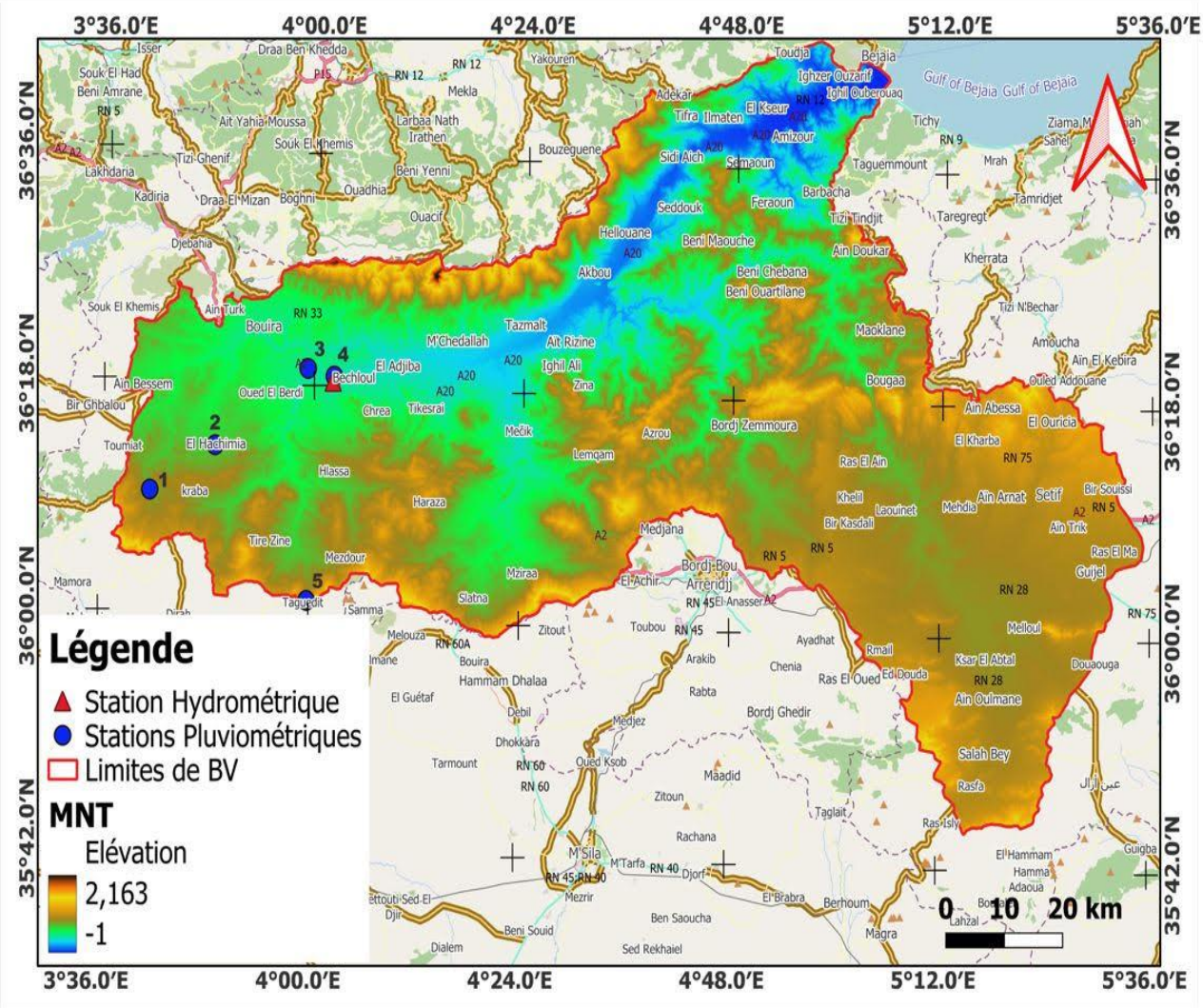


2.1. Délimitation du bassin versant de la Soummam d'après QGIS

2.2. Situation géographique

La localisation géographique de la vallée de Soummam fait que le bassin de Soummam, qui se trouve face à la vallée de Soummam (SBV Soummam, 1510), est une partie du grand bassin qui donne sur cette vallée. Ce bassin est reconnu comme l'un des 17 grands bassins hydrologiques en Algérie. Il a le code 15 selon la classification de l'ANRH (figure 2.2). Il fait partie de l'administration de la wilaya de Béjaïa (Amour, 2010). La SBV de la Soummam (code 1510) se trouve dans la partie nord-est de l'Algérie, entre les longitudes 5.09° et 4.57° et les latitudes 36.76°

et 36.48°. Le SBV Soummam est la zone qui se trouve entre Sidi Aich et l'endroit où la rivière se jette dans la mer. Il couvre les zones de 05 Daïras : Sidi Aich à l'ouest, Adekar au nord, les Daïras d'Amizour et Tichy au sud-est, et la Daïra de Bejaia au bord de la mer. La plaine alluviale de SBV Soummam s'étend sur un périmètre de 45 km et mesure entre 700 m et 2000 m (Bentomi et Hamo, 2021). SBV dans la Soummam est géographiquement limité à : • Au nord : le long de la mer Méditerranée. • Au sud : par une deuxième chaîne de montagnes qui est parallèle à la première, composée des montagnes de Babour à l'ouest, qui s'étend davantage vers l'est que les montagnes de Babour à l'est. • À l'est : par une chaîne de montagnes qui s'étend d'est en ouest, composée des montagnes d'Akfadou et de Taourirt Ighil à l'ouest, et des montagnes d'Aghbalo et de Gouraya à l'est. • À l'ouest : par l'intersection de la vallée au niveau de la côte hydrogéologique de Sidi Aich. Le bassin de l'Oued Soummam a une superficie totale de 9122 kilomètres carrés. Ce réseau hydrographique est très développé, s'étendant avec des variations fréquentes en termes de pentes et d'altitudes. On peut accéder à différents vallées et ponts en quelques secondes, ce qui contribue beaucoup à la survenance d'événements tristes dans cette région (Kessasra, 2015). Le bassin est composé de trois grandes profondeurs (figure 2.2), qui sont divisées comme suit (Khemissa et Bouab, 2016) : - le bassin de l'Oued de la Côte, situé à Sour El Ghozlane (Bouira) - Akbou, avec une superficie de 3741 kilomètres carrés ; - le bassin de l'Oued Bouslam, situé à Ain Louhmann (Sétif) à Akbou, avec une superficie de 4313 km^2 ; - le bassin sud du Soummam, près d'Akbou à Bejaïa, couvrant une superficie de 1068 km^2.



2.2. Carte de situation géographique du bassin versant de la Soummam (Daif et Hebal, 2024)

2.3. Les caractéristiques des sous bassins versants de la Soummam

2.3.1. Les caractéristiques morphométriques

2.3.1.1. La surface

La surface (A) est isolante pour recevoir les eaux de pluie et les approvisionnements en eau. Cela fait partie de la dépendance à la surface. On peut mesurer la surface des bandes variées à l'aide d'un papier de superposition de réseau spécialement conçu selon le design, en utilisant un schéma ou des modifications numériques (programmes ArcGis, Global Mapper, MapInfo, etc.). Notez que la superficie du moitié sud de la vallée de la Soummam est de 1068 kilomètres carrés (Bentoumi et Hammou, 2021).

2.3.1.2. Le périmètre

Représente l'environnement général en l'absence d'organisation des lignes de contour ou des limites de à plat. Il a été testé sur plusieurs kilomètres. Le périmètre se compose d'une ligne de connexion reliant tous les points. Il n'affecte pas le flux d'eau au niveau de la vue en plan. Cela peut aider à mesurer le soutien pour le calcul des films ou des pellicules à l'aide des programmes mentionnés ci-dessus. La longueur du périmètre est de 184 km (Bentoumi et Hammou, 2021).

2.3.2. Les caractéristiques de forme

2.3.2.1. Indice de forme de Gravilus

Pour connaître la forme d'un bassin versant, il faut utiliser l'indice de compacité de Gravelius (KG) la manière dont un bassin est formé a un impact important sur le flux général de la rivière, et surtout sur. L'apparence de l'hydrogramme à la sortie du bassin, qui vient d'une pluie précise. Il est établi en comparant le périmètre du bassin (P) à celui d'un cercle ayant la même surface (A). Cet indice est donné par la relation suivante (Bentoumi et Hammou, 2021).

$$\mathbf{KG = P/2\sqrt{\pi A} = 0.28\ P/\sqrt{A}} \qquad \mathbf{(1.1)}$$

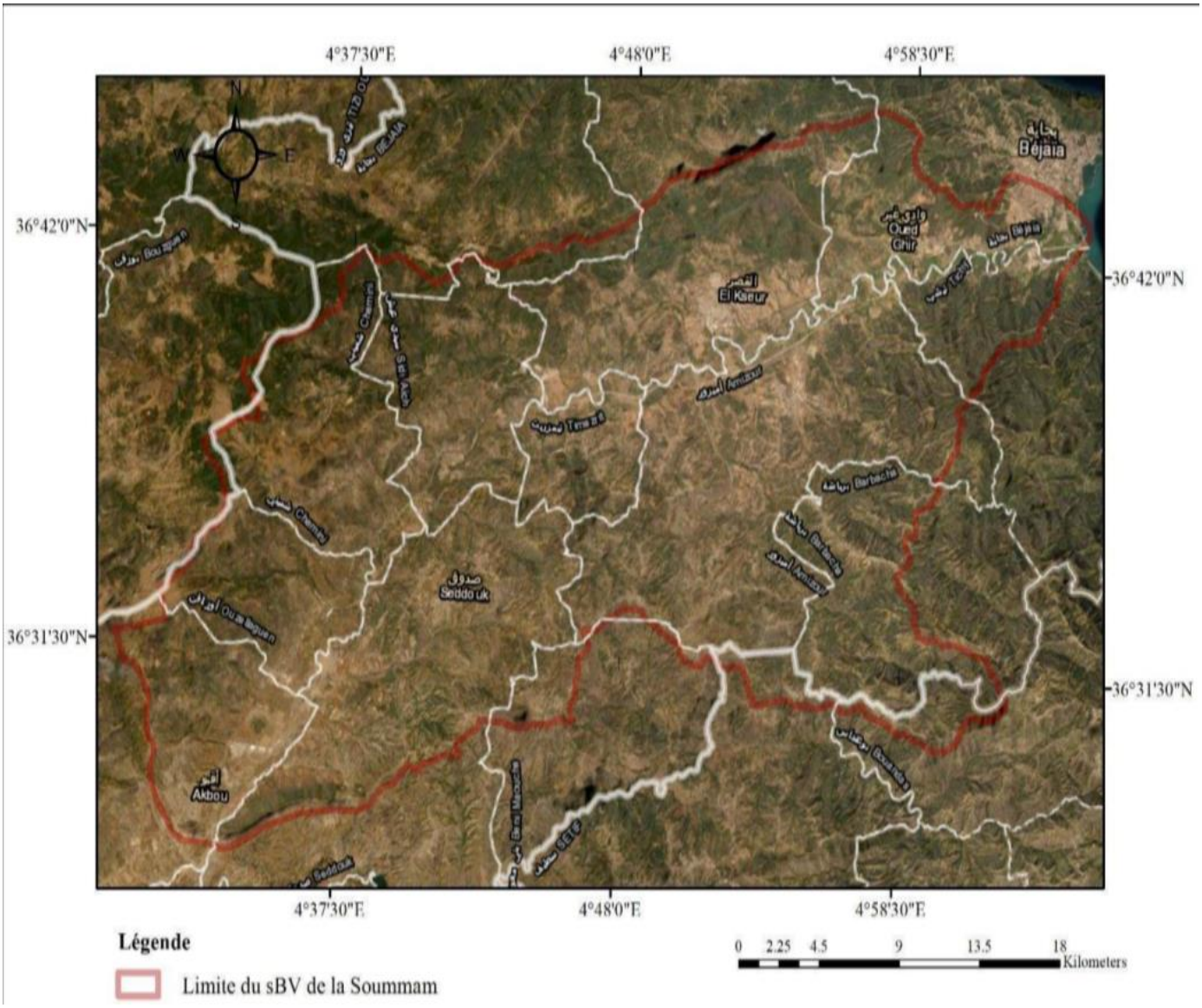
Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius,

P : Périmètre de sous-bassin versant en kilomètres (km).

A : surface de sous bassin en (km^2),

Pour notre cas, A = 1068 km² ; P = 184 km, alors KG = 1.57, ce qui signifie que notre bassin versant est de forme allongée.



2.3. Forme allongée du sous bassin de l'Oued Soummam

2.3.2.2. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent sert à transformer n'importe quelle forme d'un bassin versant en une forme plus simple rectangle avec le même périmètre, la même surface et le même indice de Gravelius (KG) afin de Comparer les bassins entre eux en ce qui concerne les différences de leurs

caractéristiques géométriques. L'écoulement. Il communique à travers le mélange de ces relations (Bentoumi et Hammou, 2021).

$$KG=0.28\ P/\sqrt{A} \qquad (1.2)$$

A = L * l

P = 2 (L + l)

Sachant que :

L : la longueur du rectangle équivalent (Km) ;

l : largeur du rectangle équivalent (Km) ;

Les formules empiriques sont présentées de cette manière :

$$Lr= [1+\sqrt{1-(1.128/ Kg)^2}]KG\sqrt{A}/1.128$$
$$lr= [1-\sqrt{1-(1.128/ Kg)^2}]KG\sqrt{A}/1.128 \qquad (1.3)$$

Les dimensions du rectangle équivalent sont : Lr = 78,2 km ; lr = 13,66 km.

2.3.3. Les caractéristiques d'altitudes

2.3.3.1. Altitudes maximale et minimale

Sont les endroits les plus hauts et les plus bas à l'endroit où l'eau sort du bassin versant. Elles sont obtenues directement à partir de la courbe hypsométrique, H min = 0 m ; H max = 1683m

2.3.3.2. Altitude moyenne

L'altitude moyenne est directement liée à la courbe hypsométrique. Elle correspond au rapport du volume des montagnes (V=∑ Ai. Hi) de la zone de drainage sur sa surface totale. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$H\ moy = \sum \underline{Ai.\ Hi}\ /At \qquad (1.4)$$

H moy = 825 m

Avec,

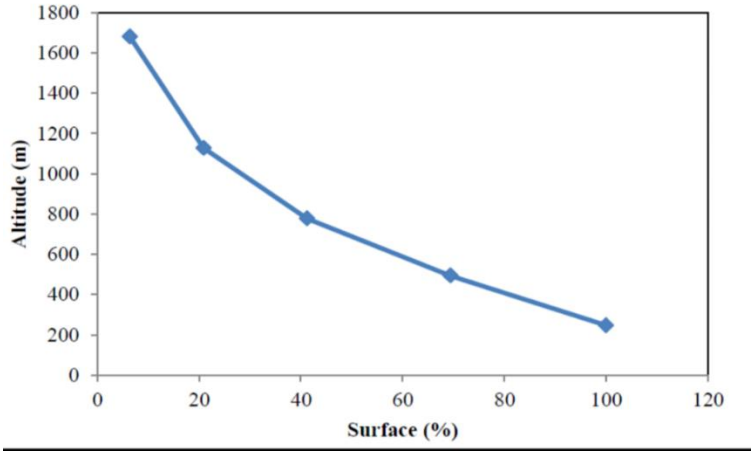
Hmoy : Hauteur moyenne du bassin versant en mètres ;

Hi : Hauteur moyenne de chaque classe en mètres ;

Ai : Partie de la surface des tranches d'altitude en km² ;

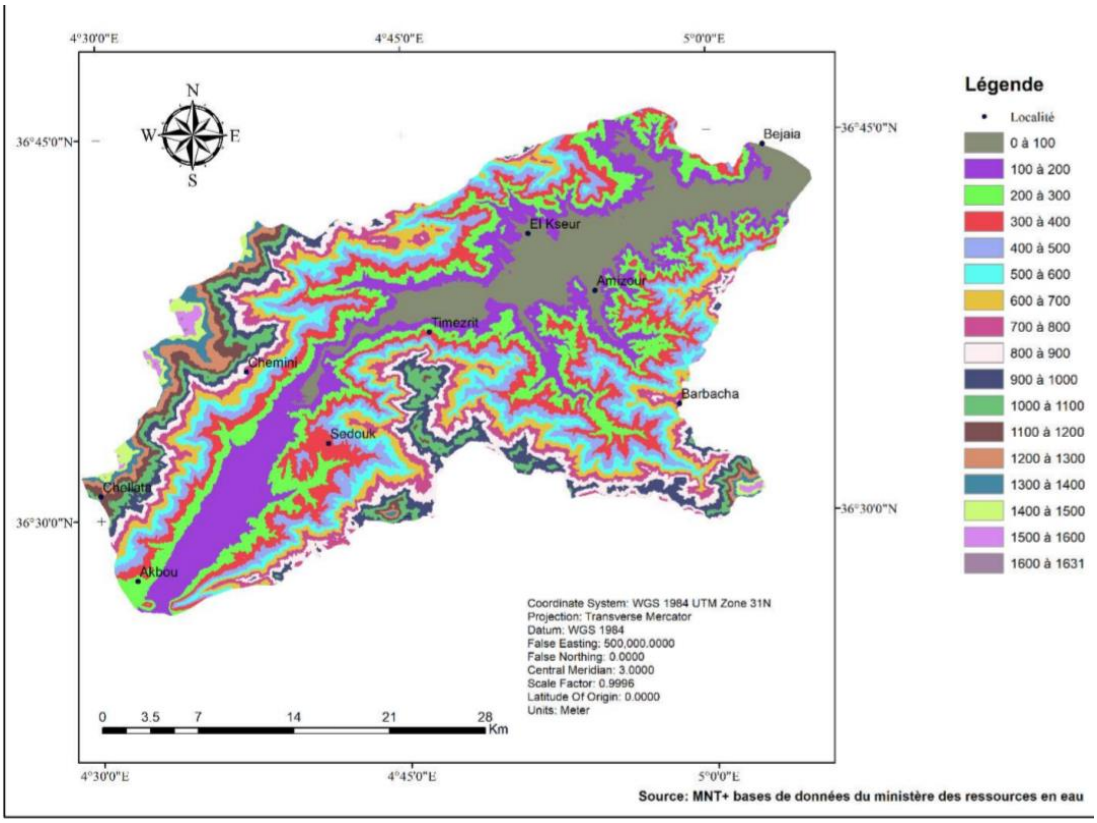
At : Surface totale du bassin en km².

Le graphe suivant représente la courbe hypsométrique d'un SBV de la Soummam. (Bentoumi et Hammou, 2021).



2.5. Courbe hypsométrique du SBV de la Soummam

La valeur de l'altitude moyenne est de 825 m.



2.6. Carte hypsométrique d'un SBV de la Soummam

Tableau2.1. Hypsométrie du SBV de la Soummam

Tranche daltitude		Surface partielle en Km²
-1	100	125.35
100	200	152.56
200	300	137.70
300	400	127.14
400	500	104.39
500	600	86.68
600	700	72.44
700	800	63.03
800	900	59.07
900	1000	48.65
1000	1100	31.87
1100	1200	19.41
1200	1300	15.21
1300	1400	11.38
1400	1500	8.72
1500	1600	4.31
1600	1632	0.15

Cette représentation montre que l classe d'altitude la plus élevée (1250 - 1683m) ne représente que 68 km², soit environ 6% de la surface totale du bassin. 31% de la surface du bassin se trouve entre 0 et 250 m d' altitude, 28% entre 250 et 500 m, 20% entre 500 et 750 m d' altitude. Le tableau suivant montre la répartition des surfaces partielles entre deux courbes de niveau.

2.4. Situation climatique

Au niveau de Bejaïa, le climat est méditerranéen typique (hiver tempéré et été chaud). En continuant vers l'intérieur du bassin versant, les températures annuelles diminuent graduellement et le climat subit des modifications. Ceci est dû à plusieurs facteurs dont les plus remarquables sont le relief et la distance à la mer. Ces facteurs ont fait que dans certaines zones du bassin se sont créé des conditions climatiques spécifiques, comme celle de la région de Bouira. L'étage bioclimatique dans lequel se situe le bassin versant de la Soummam correspond au climat humide dans la partie située au Nord (région de Bejaïa), le subhumide dans la vallée de la Soummam et le semi-aride sur les deux plateaux (Bouira et Sétif) à hiver froid, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers frais à froids avec des précipitations modérées, parfois sous forme de neige dans les zones

d'altitude. Donc, on trouve au niveau du ce bassin versant un gradient d'aridité Nord-Sud croissant. Le nord du bassin (région de Bejaïa) a une pluviosité annuelle élevée (757mm) qui décroît

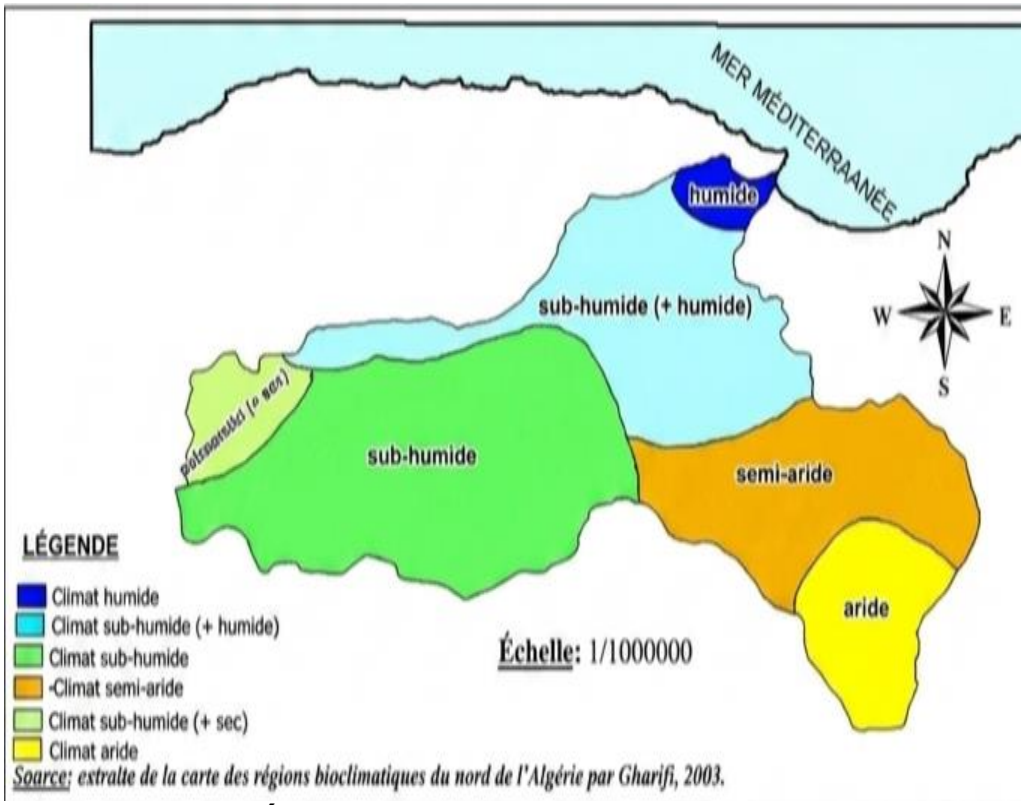


Figure 2.7. Étages bioclimatiques du bassin de la Soummam

progressivement en allant vers le sud. Elle passe jusqu'à 477mm pour la région de Bouira. La température décroît graduellement aussi du nord vers le sud et avec l'altitude. Elle passe de 18°C de la station de Bejaïa aux environs de 16°C dans la station de Bouira (ZOUGGAGHE, 2010).

2.5. Géologie

La figure, représente les différentes formations géologiques de la région de la Soummam.

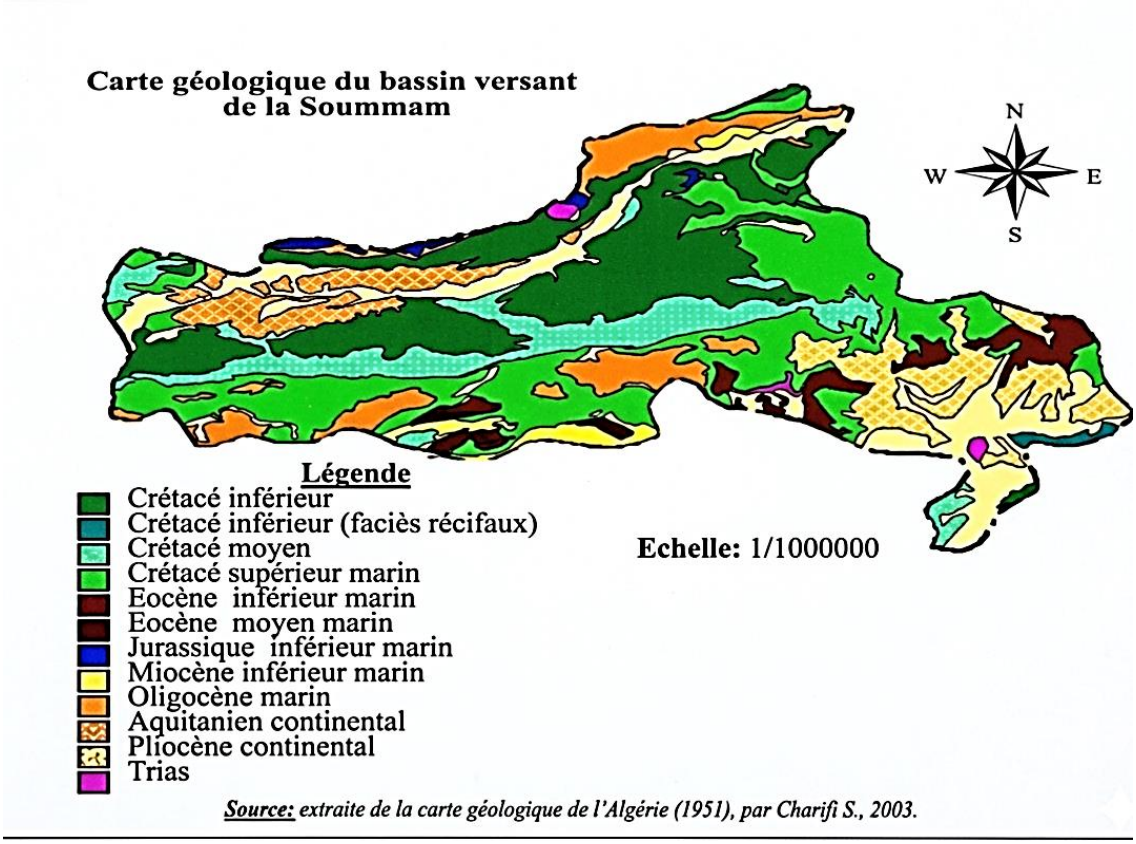


Figure 2.8. Carte géologique du bassin versant de la Soummam

Les éléments de la légende :

- Le Quaternaire : représenté par des alluvions le long des oueds et au niveau des hautes plaines.
- Le Pliocène Continental : le coteau du Sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.
- Le Miocène ; il s'agit essentiellement du Miocène inférieur. Il est continu depuis l'ouest de Bejaia jusqu'aux environs de Sidi-Aich. Il affleure également du côté de Dj. Mansourah sous forme de grés.
- L'Oligocène : il est généralement argilo-gréseux. Il affleure en abondance à partir de Tazmalt et de part et d'autre de la vallée de la Soummam, en allant vers l'ouest. On note également sa présence au niveau de la chaîne de Gouraya et de la région de Béni-Mansour.
- L'Eocène : il est quasiment marneux, parfois calcaro-marneux. Il affleure surtout au niveau des hautes plaines.

- Le Crétacé : se présente, en général, sous forme de flysch. Il est étendu, continu depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur avec quelques intercalations de grès au crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréso-pélitique, parfois carbonaté-gréseux au crétacé inférieur.
- Le Jurassique : il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est principalement calcaro-dolomitique.
- Le Trias : il est de faciès gypso-salin et apparaît le long de contacts anormaux (contact des nappes de charriage) dans le Tell méridional et est présenté par des conglomérats et des grés rougeâtres dans le Tell septentrional.

2.6. Les sols

La carte des sols du bassin de la Soummam m a été extraite de la carte des sols de l'Algérie au 1/500.000e. La numérisation de cette carte est présentée dans la figure suivante :

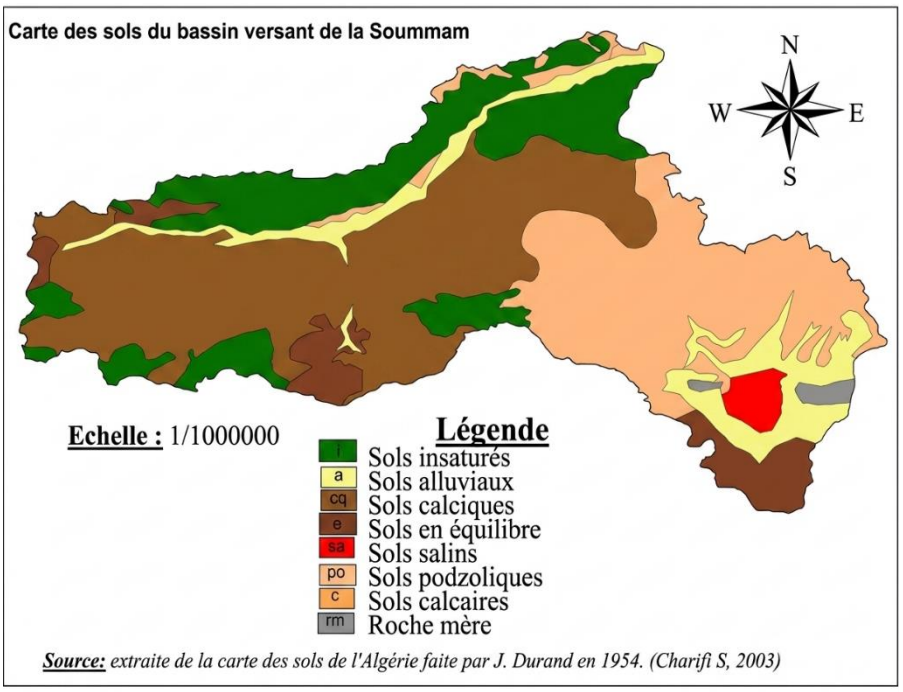


Figure 2.9. Carte des sols du bassin versant de la Soummam

La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). L'action de l'eau modifie le complexe absorbant de ces sols, de sorte qu'ils peuvent

retenir une hauteur d'eau correspondant à 20% de leur capacité totale. Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables. Lorsque les matières organiques atteignent 25%, on est en présence de la variété humifère de ces sols, qui peuvent présenter alors une texture relativement lourde allégée par la présence des matières organiques.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux à profil indifférencié ou présentent une simple accumulation de matières organiques en surface. En outre on rencontre, en petites quantités, des sols calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.

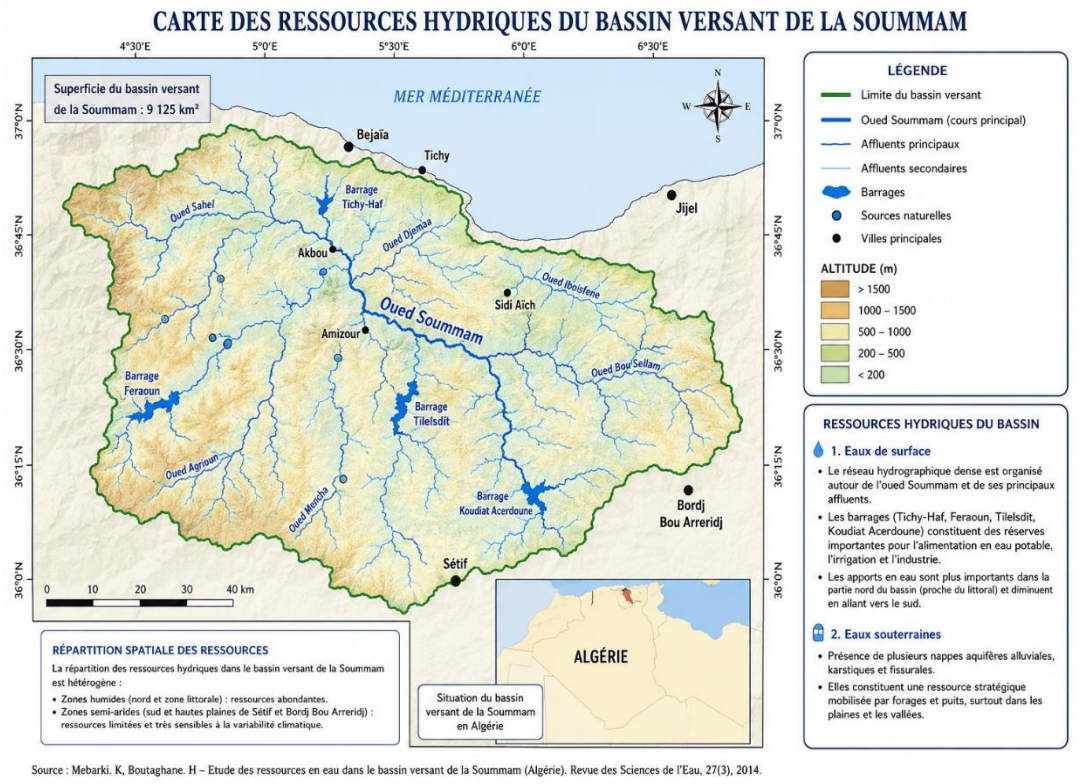
2.7. Ressources hydriques

En Algérie, l'eau devient une ressource de plus en plus importante. La concurrence que s'engagent dans l'agriculture, l'industrie et l'AEP pour accéder à des ressources limitées. L'eau grève déjà les efforts de développement dans de nombreux pays. La moyenne annuelle de la pluie dans le nord de l'Algérie est estimée entre 95 et 100 10^9 mètres cubes.

Plus de 80 millions de mètres cubes s'évaporent, 3 millions de mètres cubes s'infiltrent et 12,5 millions s'écoulent dans les rivières.

Dans le nord de l'Algérie, la principale source d'eau provient du ruissellement. En 2012, l'Algérie a 63 barrages qui peuvent contenir 10,2 milliards de mètres cubes d'eau. Le reste se déversent directement dans la mer (Bellout, 2015).

Le bassin de la Soummam, situé dans le nord-est de l'Algérie, constitue l'un des dix-sept principaux bassins hydrologiques du pays. Il couvre une superficie d'environ 9 200 km² et est drainé principalement par l'oued Soummam, issu de la confluence des oueds Sahel et Bou Sellam. Les ressources en eau du bassin proviennent essentiellement des précipitations, des eaux de surface et des nappes souterraines. Plusieurs barrages et retenues collinaires y contribuent à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation et aux usages industriels. Le bassin présente toutefois une forte variabilité hydrologique marquée par des périodes de sécheresse et des crues parfois importantes. Les aquifères alluviaux de la vallée de la Soummam constituent une ressource stratégique pour les populations locales. Malgré son potentiel hydraulique, le bassin est confronté à des défis liés à la surexploitation, à l'envasement des ouvrages et à la pollution des ressources en eau.



Source : Mebarki. K, Boutaghane. H – Etude des ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam (Algérie). Revue des Sciences de l'Eau, 27(3), 2014.

2.10. Carte des ressources hydriques du bassin versant de la Soummam

Conclusion

Cet aperçu montre que le bassin de la Soummam, de par sa forme allongée et la nature de ses sols, favorise un écoulement de surface important par rapport à l'infiltration.

Ces résultats sont indispensables pour optimiser la gestion des ressources en eau et prévenir les risques d'inondation dans la région.

Chapitre 03

Présentation et traitement de données

Introduction

L'étude des phénomènes de sécheresse nécessite l'exploitation de données hydro climatiques fiables et représentatives de la zone d'étude. Dans le bassin versant de la Soummam, les précipitations, les débits des cours d'eau ainsi que les variables climatiques intervenant dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) constituent les principales données permettant de caractériser les conditions climatiques et hydrologiques du bassin. La qualité et la cohérence de ces données conditionnent directement la fiabilité des analyses et des évaluations réalisées.

Dans le cadre de cette étude, les données hydro climatiques ont été collectées auprès de différentes sources et organisées sous forme de séries chronologiques couvrant la période d'étude. Les données exploitées comprennent les précipitations enregistrées au niveau de cinq stations pluviométriques réparties dans le bassin versant de la Soummam, les débits observés à la station hydrométrique retenue ainsi que les paramètres climatiques nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle.

Ce chapitre est consacré à la présentation des données utilisées, à la description des stations de mesure et à l'identification des différentes sources de données. Il expose également les principales étapes d'organisation, de préparation et d'analyse descriptive des séries hydro climatiques, ainsi que la méthode adoptée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle. Ces étapes constituent une base essentielle pour les analyses de la sécheresse qui seront développées dans les chapitres suivants.

3.1. Collecte des données

3.1.1. Données pluviométriques

Les données de précipitation utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). La base de données initiale comprenait sept stations de mesure réparties au sein du bassin versant de la Soummam. Les séries disponibles présentaient des périodes d'observation variables d'une station à une autre, certaines débutant dès 1926, tandis que d'autres commençaient plus tard, notamment à partir des années 1960 ou 1990. L'ensemble des séries disponibles s'étend jusqu'à l'année 2021.

Une analyse préliminaire des données a révélé la présence de nombreuses lacunes et de périodes d'observation incomplètes dans certaines stations. Ces insuffisances peuvent affecter la qualité des analyses statistiques ainsi que la fiabilité des indices de sécheresse calculés.

Afin de disposer de séries homogènes et comparables, une procédure de sélection a été appliquée en tenant compte principalement de la continuité des données, de la longueur des séries et du nombre de valeurs disponibles. À l'issue de cette étape, cinq stations ont été retenues pour l'analyse. La période commune allant de 1975 à 2020 a été adoptée comme période d'étude, car elle correspond à l'intervalle présentant la meilleure disponibilité et la meilleure continuité des données pour l'ensemble des stations sélectionnées.

3.1.2. Données climatique

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été extraites de la base de données de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Elles comprennent les températures minimales, maximales et moyennes, l'humidité relative, la vitesse du vent ainsi que le rayonnement solaire.

Ces variables ont été exploitées exclusivement pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode adoptée dans cette étude. Les séries climatiques disponibles couvrent la période 1981–2020 et présentent une continuité suffisante pour le calcul de l'ETP à l'échelle du bassin versant de la Soummam.

Le recours à ces données permet de disposer des paramètres climatiques nécessaires à l'évaluation du bilan hydrique et à l'analyse des conditions de sécheresse.

3.1.3. Données hydrométriques

Les données hydrométriques utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). La base de données initiale comprenait plusieurs stations hydrométriques réparties au niveau du bassin versant de la Soummam.

L'examen des séries de débits disponibles a montré que la majorité des stations présentaient d'importantes lacunes, avec des périodes d'observation très limitées ou des séries

comportant un nombre insuffisant de données exploitables. Ces contraintes ne permettaient pas leur utilisation dans le cadre d'une analyse fiable de la sécheresse hydrologique.

Afin de garantir la qualité et la cohérence des résultats, une sélection des données a été effectuée sur la base de la continuité et de la disponibilité des observations. À l'issue de cette étape, une seule station hydrométrique a été retenue, disposant d'une série de débits relativement complète couvrant la période 1967–2020. Cette série a été utilisée pour l'évaluation de la sécheresse hydrologique à travers le calcul du Streamflow Drought Index (SDI).

3.2. Présentation des données utilisées

Dans le cadre de cette étude, trois types de données ont été utilisés afin de caractériser les conditions hydro climatiques du bassin versant de la Soummam. Il s'agit des données pluviométriques, constituées des séries de précipitations enregistrées aux différentes stations du bassin, des données hydrométriques relatives aux débits observés à la station hydrométrique retenue, ainsi que des données climatiques nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), notamment la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Ces données constituent la base de l'ensemble des analyses réalisées dans cette étude.

3.2.1. Acquisition des données hydro climatiques

La collecte des données constitue l'une des étapes les plus importantes et les plus délicates dans toute étude hydrologique et climatique. La fiabilité des résultats obtenus dépend en grande partie de la qualité, de la continuité et de la représentativité des données utilisées. Cette phase est souvent confrontée à plusieurs contraintes, notamment la disponibilité limitée des observations, l'existence de lacunes dans les séries chronologiques ainsi que l'absence de mesures continues sur de longues périodes.

Dans le cadre de cette étude, les données pluviométriques et hydrométriques ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), organisme chargé du suivi, de la gestion et de l'archivage des données hydrologiques en Algérie. Plusieurs stations de mesure localisées dans le bassin versant de la Soummam ont été consultées afin

d'obtenir des séries chronologiques suffisamment longues pour l'analyse des phénomènes de sécheresse.

Toutefois, l'examen préliminaire des données disponibles a montré que plusieurs stations présentaient des lacunes importantes, des périodes d'interruption d'observation ou des séries incomplètes, limitant ainsi leur exploitation dans le cadre de cette étude. Afin de garantir la fiabilité des analyses, seules les stations disposant de séries relativement longues et présentant un niveau acceptable de continuité ont été retenues.

Concernant les données climatiques nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), notamment les températures de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire, leur collecte à partir des réseaux d'observation locaux s'est révélée difficile en raison de l'indisponibilité de séries complètes couvrant l'ensemble de la période d'étude. Pour pallier cette insuffisance, les données climatiques ont été extraites de la base de données de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), qui fournit des séries climatiques continues et homogènes sur de longues périodes. Cette source est largement utilisée dans les études hydrologiques et climatiques lorsque les observations locales sont insuffisantes ou présentent des lacunes importantes.

L'ensemble des données collectées couvre la période 1975–2021 et constitue la base de travail utilisée pour l'analyse de la variabilité hydro climatique du bassin versant de la Soummam ainsi que pour le calcul des indices de sécheresse retenus dans cette étude.

3.2.2. Traitement et préparation des données

Avant toute analyse, les données collectées ont fait l'objet d'une phase de traitement et de préparation visant à garantir leur qualité, leur cohérence et leur fiabilité. Cette étape constitue une phase essentielle dans les études hydrologiques et climatiques, car la précision des résultats dépend directement de la qualité des séries de données utilisées.

Dans un premier temps, l'ensemble des séries pluviométriques, hydrométriques et climatiques disponibles a été soumis à une analyse préliminaire afin d'évaluer leur longueur, leur continuité et leur représentativité. Plusieurs stations présentaient des périodes d'observation relativement courtes ou comportaient d'importantes lacunes, ce qui pouvait affecter la fiabilité des analyses de sécheresse. Par conséquent, seules les séries disposant d'une durée d'observation suffisamment longue, généralement supérieure à 40 ans, ont été retenues pour cette étude.

Dans un second temps, une vérification détaillée des données manquantes a été réalisée. Les lacunes identifiées dans les séries retenues ont fait l'objet d'un traitement spécifique afin d'assurer la continuité des chroniques. Pour cela, deux méthodes de comblement ont été appliquées et comparées : la méthode de la moyenne mensuelle, basée sur les valeurs moyennes observées pour le mois considéré, et la méthode de la régression linéaire, qui exploite les relations statistiques existantes entre les stations voisines. Le choix de la méthode la plus appropriée a été effectué en fonction de la disponibilité des données et de la qualité des relations observées entre les séries.

Cette phase de traitement a nécessité une attention particulière afin de limiter les incertitudes associées au comblement des données manquantes et de garantir la constitution d'une base de données homogène et fiable. Les séries ainsi corrigées et validées ont ensuite été organisées sous forme de chroniques mensuelles destinées aux analyses statistiques et au calcul des indices de sécheresse.

3.2.3. Présentation des stations de mesure utilisées

Dans le cadre de cette étude, les analyses de sécheresse ont été réalisées à partir de données issues de cinq stations pluviométriques réparties au sein du bassin versant de la Soummam. Le choix de ces stations repose principalement sur la disponibilité, la continuité et la longueur des séries d'observation, ainsi que sur leur répartition spatiale permettant de représenter les différentes conditions climatiques du bassin.

Les données pluviométriques ont été utilisées pour l'analyse de la variabilité des précipitations et le calcul des indices de sécheresse météorologique et climatique. En complément, une station hydrométrique, correspondant au code 150204, a été retenue pour l'exploitation des données de débit nécessaires au calcul de l'indice de sécheresse hydrologique (SDI).

Par ailleurs, les paramètres climatiques nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été extraits pour une station climatique représentative de l'ensemble du bassin versant de la Soummam. Cette station a été considérée comme représentative des conditions climatiques générales de la zone d'étude et a servi à l'établissement de la série d'ETP utilisée dans les analyses.

Les principales caractéristiques des cinq stations pluviométriques retenues sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées dans cette étude

Station	Code station	Latitude	Longitude	Altitude	Période
SOUREL GHOZLAN	150101	590,60	316,45	882	1975-2021
El HACHIMIA	150103	600,65	325,10	730	1975-2021
BOUIRA	150208	616,00	337,25	520	1975-2021
El ESNAM SH	150204	620,40	335,50	435	1975-2021
KHEMIS	150201	616,50	303,20	1055	1975-2021

Source : ANRH (2024). Coordonnées exprimées selon le système de projection utilisé par l'organisme fournisseur des données.

D'après le tableau, les stations pluviométriques retenues présentent une répartition spatiale relativement représentative du bassin versant de la Soummam. Elles couvrent différentes zones du bassin et des altitudes variées, ce qui permet de mieux appréhender la variabilité spatiale des précipitations.

Par ailleurs, les périodes d'observation disponibles diffèrent d'une station à une autre, mais restent suffisamment longues pour permettre une analyse fiable de la variabilité climatique et des épisodes de sécheresse sur le long terme.

3.2.4. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

3.2.4.1. Principe général

L'évapotranspiration potentielle (ETP) constitue un paramètre fondamental dans les études hydrologiques et climatiques. Elle représente la quantité maximale d'eau susceptible d'être transférée vers l'atmosphère par les processus combinés d'évaporation et de transpiration lorsque l'eau est disponible en quantité suffisante. L'ETP intervient directement dans l'évaluation du bilan hydrique et constitue une variable essentielle pour l'analyse des phénomènes de sécheresse, notamment dans le calcul de l'indice SPEI.

Dans le cadre de cette étude, l'évapotranspiration potentielle a été estimée à partir des données climatiques extraites de la base de données NASA POWER. Les variables utilisées comprennent la température maximale, la température minimale, l'humidité relative, la vitesse du vent ainsi que le rayonnement solaire. Ces données couvrent l'ensemble de la période d'étude

et sont considérées comme représentatives des conditions climatiques du bassin versant de la Soummam.

3.2.4.2. Méthode de calcul

A l'aide de la formule de Penman-**Monteith** modifiée (FAO), nous calculerons l'ETP. La formule de Penman-Monteith se distingue parmi les différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétale, dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'experts opérants dans différent contextes climatiques, a adapté la formule Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition «l'évapotranspiration de référence». Allen et al. (1998) ont définit l'ET_0 comme : l'évapotranspiration d'un couvert végétale « hypothétique » de référence ayant une hauteur de 12 cm, une résistance du couvert de 70 s/m et un albédo de 23%. Un couvert de gazon se développe activement sur une grande étende régulièrement tendu, bien alimenté en eau et indemne de maladies.

L'évapotranspiration de référence peut s'écrire selon la formule :

$$ET0 = \frac{0{,}408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{Cste}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u_2)} \quad (3.1)$$

Avec :

ET_0 : Evapotranspiration de référence journalière (mm/j) ;

Rn : Rayonnement net à la surface de culture (MJ/m^2/j) ;

G : Flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m^2/j) ; qui est à la l'échelle de journée pratiquement nul, en effet le gain diurne de chaleur par le sol équilibre la perte nocturne ;

T : Température moyenne journalière (°C) ;

U_2 : Vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres (m/s) ;

e_s et **e_a** : Sont respectivement la pression de vapeur saturante et la pression réelle de l'air à la même hauteur (kPa) ;

γ : Constant psychrométrique (kPa /°C) ;

900 : Coefficient pour la culture de référence (kg k/ kJ) liées aux unités utilisées à la distribution de variables ρ, c_p et r_a ;

0.34 : Coefficient de vent pour la culture de référence (kg K/ kJ) résultat du rapport r_s / r_a ;

0.408 : inverse de λ = 2.45 MJ/ kg ;

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température T (kPa /°C).

Où :

$$\Delta = \frac{4098\left[0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2}$$

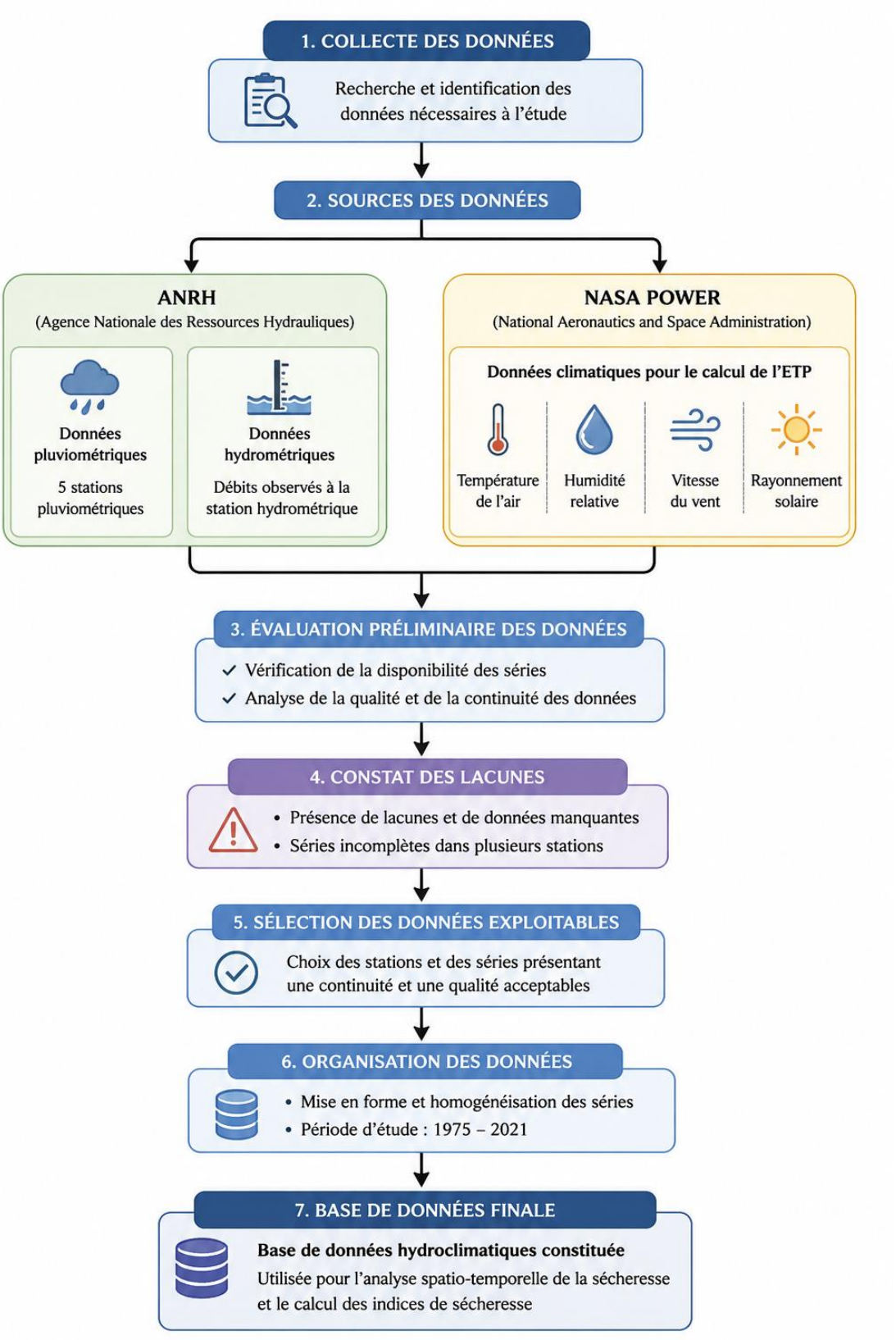


Figure 3.1. Schéma méthodologique de collecte et de traitement des données

3.3. Analyse statistique descriptive des données

L'analyse statistique descriptive constitue une étape essentielle dans l'étude des séries hydro climatiques. Elle permet de caractériser les principales propriétés des données utilisées, d'évaluer leur variabilité et de mettre en évidence les différences existant entre les stations étudiées. Dans cette étude, les statistiques descriptives ont été calculées pour les séries mensuelles de précipitations des cinq stations pluviométriques, ainsi que pour les séries d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de débit observé (Q). Les paramètres retenus comprennent l'effectif (N), la moyenne, les valeurs minimale et maximale, les quartiles, la médiane et la variance. Ces indicateurs permettent d'apprécier la tendance centrale, la dispersion et la variabilité des données avant l'application des indices de sécheresse.

Tableau 3.2. Caractéristiques statistique descriptive des données exploitées

Série	N	Moyenne	Min	1er Quartile	Médiane	3e Quartile	Max	Variance
150101 P1	564	37.627	0	10.275	28.45	57.086	230.4	1312.442
150103 P2	564	30.304	0	6.075	22.75	46.325	230.3	920.561
150204 P3	564	11.29	0	3.4	9.05	17.025	46.4	97.269
150201 P4	564	12.617	0	4	11	17.775	59.9	120.078
150208 P5	564	13.994	0	5.075	11.5	19.925	92.4	149.202
ETP	564	129.624	26.981	55.906	119.046	196.626	293.033	5724.33
Débit	480	0.486	0.003	0.098	0.246	0.46	15.681	0.992

Les résultats du tableau montrent une importante variabilité spatiale des précipitations au sein du bassin versant de la Soummam. La station 150101 présente la pluviométrie moyenne mensuelle la plus élevée avec 37,63 mm, suivie de la station 150103 avec 30,30 mm À l'inverse,

les stations 150204, 150201 et 150208 enregistrent des moyennes plus faibles, comprises entre 11 et 14 mm, traduisant des conditions climatiques relativement plus sèches.

Les valeurs minimales nulles observées pour l'ensemble des stations indiquent l'existence de mois sans précipitations, phénomène caractéristique du climat méditerranéen marqué par une forte saisonnalité des pluies. Les valeurs maximales atteignent respectivement 230,4 mm et 230,3 mm pour les stations 150101 et 150103, révélant l'occurrence d'événements pluvieux intenses.

L'évapotranspiration potentielle présente une moyenne mensuelle de 129,62 mm, largement supérieure aux précipitations moyennes observées. Cette situation traduit une forte demande évaporative de l'atmosphère et met en évidence la vulnérabilité du bassin aux déficits hydriques, notamment durant la saison estivale.

Concernant les débits, la moyenne mensuelle observée est de 0,486 m^3/s avec un maximum de 15,68 m^3/s. L'écart important entre les valeurs minimales et maximales traduit une forte irrégularité du régime hydrologique et une réponse sensible du bassin aux épisodes pluvieux.

Les variances observées sont particulièrement élevées pour les stations 150101, 150103 ainsi que pour l'ETP, indiquant une forte dispersion des données autour de la moyenne et confirmant l'existence d'une variabilité temporelle importante des conditions hydro climatiques.

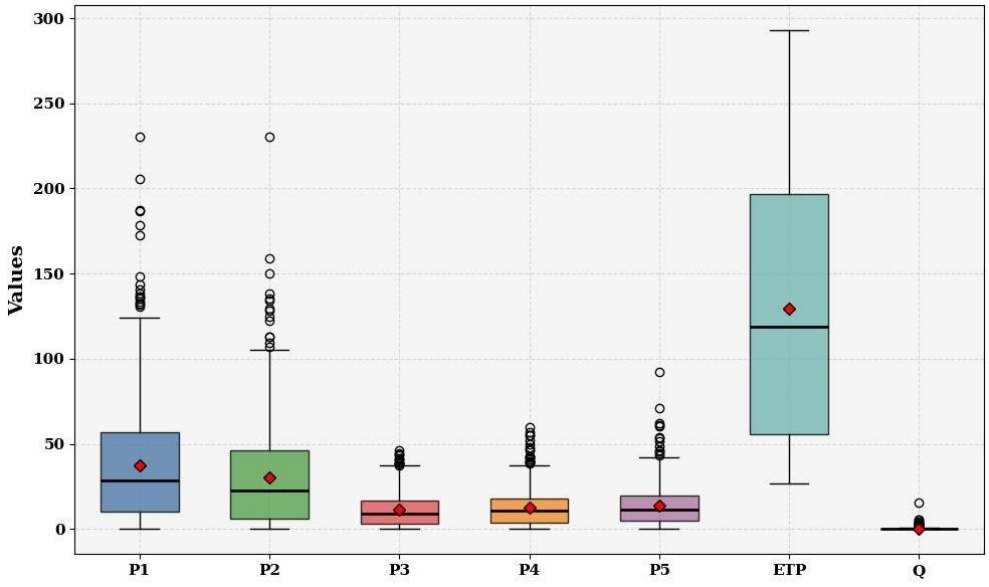


Figure 3.2. Diagrammes en boîte (Boxplots) des précipitations, de l'ETP et du débit observé.

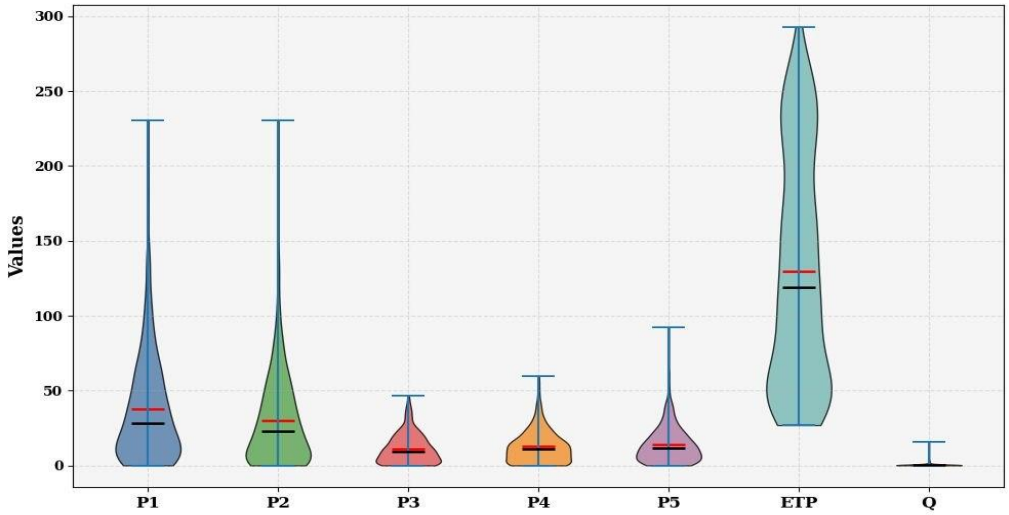


Figure 3.3. Diagrammes de violon (Violin plots) des précipitations, de l'ETP et du débit observé.

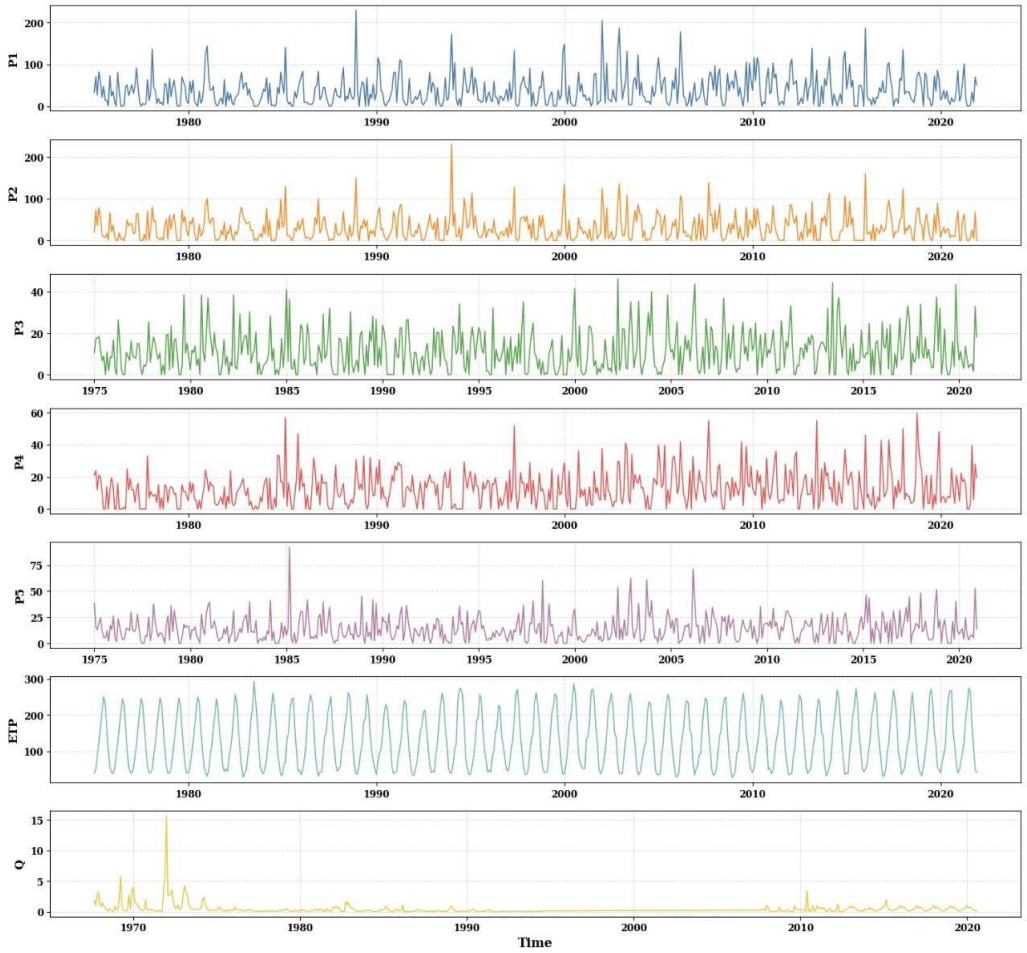


Figure 3.4. Variation temporelle des précipitations, de l'ETP et du débit observé durant la période d'étude.

Les figures précédentes présentent les distributions statistiques et l'évolution temporelle des précipitations aux cinq stations étudiées, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du débit observé. L'analyse conjointe des boxplots, des diagrammes de violon et des séries chronologiques met en évidence une forte variabilité des conditions hydro climatiques au sein du bassin versant de la Soummam.

Les boxplots révèlent une dispersion importante des précipitations ainsi que la présence de nombreuses valeurs extrêmes, traduisant l'occurrence d'événements pluvieux exceptionnels durant la période d'étude. Cette variabilité est particulièrement marquée pour les stations 150101 et 150103, qui présentent également les valeurs moyennes les plus élevées. Les diagrammes de violon confirment ces observations en montrant que la majorité des valeurs de précipitations est concentrée autour des faibles intensités, tandis que les fortes pluies demeurent relativement rares mais significatives.

L'évapotranspiration potentielle présente une variabilité saisonnière très marquée, avec des valeurs élevées durant les périodes chaudes et sèches et des valeurs plus faibles pendant la saison hivernale. Sa distribution est nettement plus étendue que celle des précipitations, traduisant l'importance de la demande évaporative dans le bassin versant.

Les séries chronologiques mettent en évidence l'alternance de périodes humides et sèches ainsi qu'une forte irrégularité interannuelle des précipitations et des débits. Contrairement aux précipitations et aux débits, la série d'ETP présente une évolution cyclique régulière reflétant l'influence directe des variations saisonnières des paramètres climatiques. Les débits observés montrent quant à eux une forte variabilité temporelle caractérisée par quelques épisodes de crues importantes et de longues périodes de faibles écoulements.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment le caractère fortement variable du régime hydro climatique du bassin versant de la Soummam et justifient l'utilisation des indices SPI, SPEI et SDI pour l'analyse des différentes formes de sécheresse au cours de la période étudiée.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différentes données exploitées dans le cadre de cette étude ainsi que les principales étapes de leur organisation et de leur traitement préliminaire. Les séries de précipitations, de débits et les paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'ETP ont été structurés et analysés à travers une approche statistique descriptive afin de mieux caractériser leur comportement temporel et spatial. Ces traitements constituent une étape essentielle garantissant la fiabilité des analyses relatives à l'évaluation de la sécheresse. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du matériel et des méthodes adoptés, notamment les approches de calcul des indices SPI, SPEI et SDI.

Chapitre 04
Matériel et méthodes

Introduction

Ce chapitre présente, le matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée pour l'évaluation spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam. L'étude repose sur l'exploitation des données hydro-climatiques disponibles, notamment les précipitations, les données climatiques nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi que les données de débit.

La démarche méthodologique adoptée, comprend plusieurs étapes successives, allant de la préparation des données à l'application des indices de sécheresse SPI, SPEI et SDI. Ces indices ont été utilisés afin de caractériser les épisodes de sécheresse selon leurs dimensions climatique et hydrologique, et d'analyser leur évolution dans le temps et dans l'espace au niveau du bassin versant étudié.

Ce chapitre décrit, également, les méthodes de calcul appliquées ainsi que les outils mobilisés pour le traitement et l'analyse des données.

4.1. Présentation des données et matériel utilisé

4.1.1- Données utilisées

Dans le cadre de cette étude portant sur l'évaluation spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam, différentes données hydro-climatiques ont été collectées et exploitées afin d'évaluer l'évolution de la sécheresse et d'analyser sa variabilité spatio-temporelle. Les données utilisées couvrent une période allant de 1975 à 2021, permettant ainsi d'étudier les fluctuations hydro-climatiques sur de long terme.

- **Données de précipitations**

Les données de précipitations mensuelles ont été utilisées pour l'évaluation de la sécheresse météorologique à travers le calcul de l'indice normalisé des précipitations (SPI). Ces données permettent de mettre en évidence les périodes déficitaires ou excédentaires en précipitations selon différentes échelles temporelles. Les séries pluviométriques exploitées proviennent des stations météorologiques sélectionnées dans et autour du bassin versant de la Soummam.

- **Données climatiques utilisées pour le calcul de l'ETP**

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été réalisé à l'aide de la méthode de python, considérée comme une approche adaptée pour l'estimation des besoins évaporatifs de l'atmosphère. Les données climatiques nécessaires au calcul de l'ETP ont été exploitées afin d'élaborer l'indice normalisé des précipitations et de l'évapotranspiration (SPEI), qui prend en compte à la fois l'effet des précipitations et des conditions climatiques.

➢ Données de débit hydrologique

Les données de débit mensuel ont été utilisées pour l'analyse de la sécheresse hydrologique à travers l'indice de sécheresse des débits (SDI). Ces données permettent d'évaluer les déficits hydrologiques observés au niveau du bassin versant et d'identifier les périodes caractérisées par une diminution significative des écoulements.

➢ Période d'étude

La période d'étude s'étend de 1975 à 2021, soit une série temporelle suffisamment longue pour analyser les tendances de la sécheresse, identifier les périodes critiques et évaluer la variabilité hydro climatique au sein du bassin versant de la Soummam.

➢ Présentation des stations utilisées

L'étude repose sur les données enregistrées au niveau de cinq stations météorologiques sélectionnées selon la disponibilité et la continuité des données. Il s'agit des stations de Sour El Ghozlane, El Hachimia, El Esnam, Bouira et Khemis Miliana. La répartition spatiale de ces stations permet d'obtenir une meilleure représentativité des conditions hydro climatiques du bassin versant de la Soummam et de mettre en évidence la variabilité spatiale des phénomènes de sécheresse.

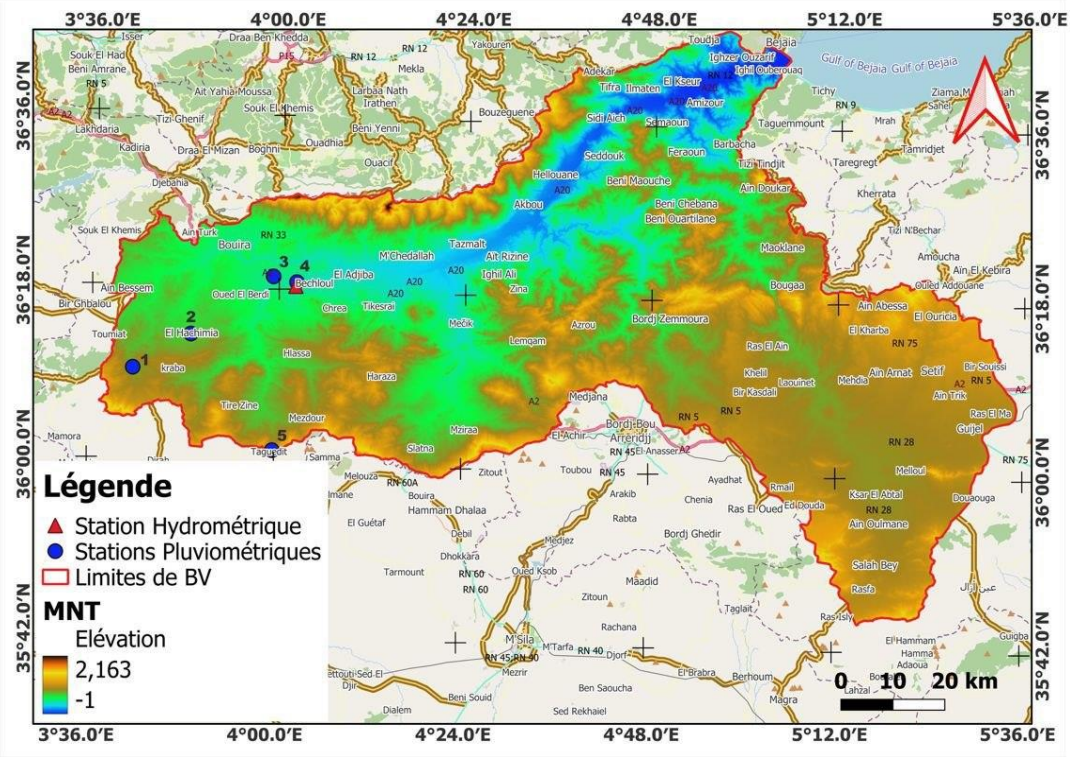


Figure 4.1. Localisation des stations météorologiques et hydrométriques dans le bassin versant de la Soummam

Source : Réalisé par les auteurs à partir des données SIG, 2026

4.1.2- Outils et logiciels utilisés

Dans le cadre de cette étude, plusieurs outils informatiques ont été utilisés pour le traitement des données, le calcul des indices de sécheresse et la réalisation des cartes thématiques.

Microsoft Excel

Microsoft Excel a constitué un outil essentiel pour la gestion et le prétraitement des données hydro climatiques utilisées dans cette étude. Il a été employé pour l'organisation des bases de données relatives aux précipitations, aux variables climatiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi qu'aux débits hydrologiques. Excel a également permis la vérification de la cohérence des séries chronologiques, la détection d'éventuelles valeurs aberrantes et la mise en forme des données avant leur traitement. Grâce à ses fonctionnalités de calcul et de gestion de données, cet outil a facilité la préparation des jeux de

données nécessaires aux différentes étapes de l'analyse de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam.

Python

Le langage de programmation Python a été utilisé comme outil principal pour le traitement et l'analyse des données hydro climatiques. Grâce à sa capacité à gérer de grandes séries temporelles et à automatiser les traitements numériques, il a permis d'effectuer les calculs nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Penman ainsi qu'à la détermination des indices de sécheresse étudiés. L'utilisation de Python a contribué à réduire les erreurs liées aux calculs manuels et à assurer la reproductibilité des résultats obtenus. En outre, cet outil a facilité le traitement des données sur une longue période d'étude (1975–2021), permettant ainsi une analyse rigoureuse de la variabilité temporelle des conditions hydro climatiques au sein du bassin versant de la Soummam.

QGIS

Le logiciel QGIS (Quantum Geographic Information System) a été utilisé pour l'analyse spatiale et la représentation cartographique des données de l'étude. Ce système d'information géographique a permis l'intégration et le traitement des différentes couches géographiques relatives au bassin versant de la Soummam, notamment les limites du bassin, le modèle numérique de terrain (MNT) et la localisation des stations météorologiques et hydrométriques. QGIS a également été utilisé pour la production des cartes thématiques illustrant la répartition spatiale des paramètres étudiés et des indices de sécheresse. L'exploitation de cet outil a contribué à une meilleure compréhension de la variabilité spatiale du phénomène de sécheresse et à la mise en évidence des zones les plus affectées à l'échelle du bassin versant.

4.2. Démarche méthodologique de l'étude

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur une approche intégrante l'analyse des données hydro climatiques, le calcul des indices de sécheresse et l'analyse spatiale des résultats. Cette démarche vise à évaluer la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam durant la période 1975–2021.

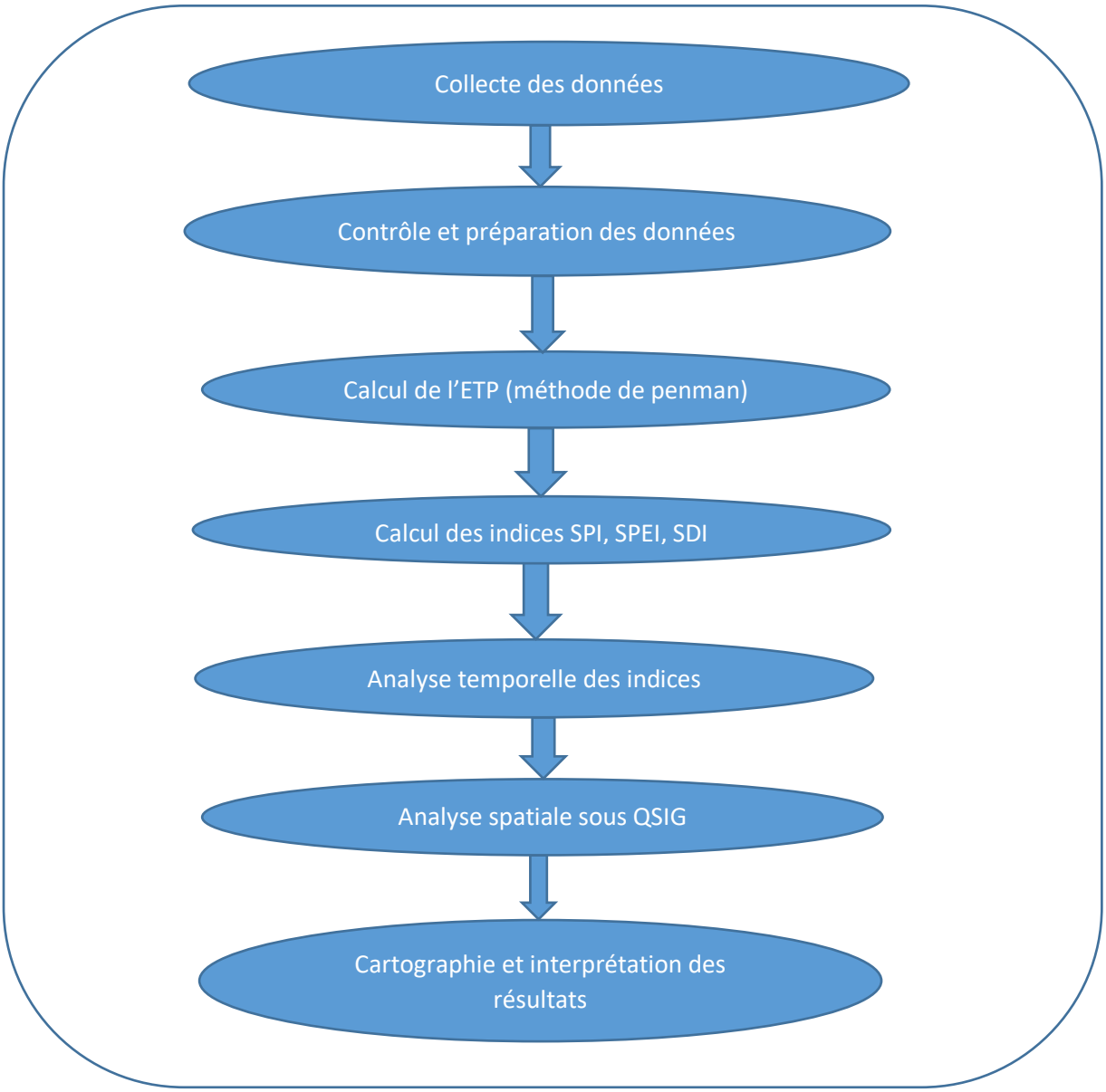


Figure 4.2. Démarche méthodologique de l'étude

Dans un premier temps, les données climatiques et hydrologiques ont été collectées et organisées afin de constituer une base de données cohérente et exploitable. Après les étapes de contrôle et de préparation des séries chronologiques, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été estimée selon la méthode de Penman. Les données obtenues ont ensuite été utilisées pour le calcul des indices de sécheresse SPI, SPEI et SDI, permettant d'évaluer respectivement les déficits pluviométriques, climatiques et hydrologiques.

Enfin, les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse temporelle et spatiale à l'aide d'outils statistiques et géomatiques afin d'identifier les périodes de sécheresse et leur répartition à l'échelle du bassin versant de la Soummam.

4.2.1- Préparation et traitement des données

Avant toute analyse, les données hydro climatiques collectées ont fait l'objet d'une phase de préparation et de traitement afin de garantir leur qualité et leur cohérence. Cette étape constitue une phase essentielle dans les études de sécheresse, car la fiabilité des résultats dépend directement de la qualité des données utilisées.

Les séries chronologiques relatives aux précipitations, aux variables climatiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi qu'aux débits hydrologiques ont été organisées sous forme de bases de données mensuelles couvrant la période 1975–2021. Les données ont été vérifiées afin d'identifier d'éventuelles erreurs de saisie, incohérences ou valeurs aberrantes susceptibles d'influencer les résultats des calculs.

Par la suite, les données ont été structurées et préparées pour être exploitées dans les différentes étapes de traitement numérique. Cette opération a permis d'obtenir des séries homogènes et adaptées au calcul des indices de sécheresse SPI, SPEI et SDI. Les données préparées ont ensuite été intégrées dans l'environnement de calcul afin d'effectuer les traitements nécessaires à l'analyse de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam.

4.2.2- Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité maximale d'eau susceptible d'être transférée vers l'atmosphère par évaporation et transpiration lorsque les ressources en eau sont disponibles en quantité suffisante. Ce paramètre constitue un indicateur essentiel dans les études climatiques et hydrologiques, puisqu'il permet d'évaluer la demande évaporative de l'atmosphère et son influence sur les ressources en eau.

Dans le cadre de cette étude, l'ETP a été estimée selon la méthode de Penman, largement utilisée dans les travaux hydrologiques en raison de sa capacité à intégrer l'effet des principaux paramètres météorologiques intervenant dans le processus d'évapotranspiration. Cette méthode prend en considération les conditions climatiques influençant les échanges d'eau entre la surface terrestre et l'atmosphère.

Le calcul de l'ETP a été réalisé à l'aide d'un script développé sous l'environnement Python. Les données climatiques disponibles ont été introduites dans le programme afin d'obtenir des séries temporelles d'évapotranspiration potentielle couvrant l'ensemble de la période d'étude (1975–2021). Les valeurs obtenues ont ensuite été utilisées dans le calcul de l'indice SPEI, permettant d'intégrer simultanément l'effet des précipitations et de la demande climatique dans l'évaluation de la sécheresse.

Les séries d'ETP calculées constituent ainsi une composante fondamentale de l'analyse hydro climatique menée dans le bassin versant de la Soummam et contribuent à une meilleure compréhension de l'évolution des conditions de sécheresse au cours de la période étudiée.

4.2.3- Calcul des indices de sécheresse

L'évaluation de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam a été réalisée à travers l'utilisation de trois indices largement employés dans les études hydro climatiques : le Standardized Précipitation Index (SPI), le Standardized Précipitation Evapotranspiration Index (SPEI) et le Streamflow Drought Index (SDI).

Ces indices ont été calculés à différentes échelles temporelles, à savoir 1, 3, 6 et 12 mois, afin de mettre en évidence les différentes manifestations de la sécheresse. Les échelles courtes permettent d'identifier les variations rapides des conditions hydro climatiques, tandis que les échelles plus longues mettent en évidence les tendances persistantes et les épisodes de sécheresse prolongés.

Le calcul du SPI repose exclusivement sur les données de précipitations, alors que le SPEI prend en compte à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, permettant ainsi d'intégrer l'influence des conditions climatiques sur la disponibilité en eau. Quant au SDI, il est basé sur les données de débit et permet d'évaluer directement l'intensité de la sécheresse hydrologique au niveau des écoulements de surface.

L'utilisation combinée de ces trois indices permet d'obtenir une vision globale du phénomène de sécheresse et d'analyser les relations entre les déficits pluviométriques, les conditions climatiques et les réponses hydrologiques observées au sein du bassin versant de la Soummam.

4.3. Méthodes de calcul des indices de sécheresse

Afin de caractériser les différentes formes de sécheresse observées dans le bassin versant de la Soummam, trois indices complémentaires ont été utilisés : le SPI, le SPEI et le SDI. Ces indices ont été calculés aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois afin d'analyser la variabilité de la sécheresse à court, moyen et long terme.

Le choix de ces indices repose sur leur large utilisation dans les études hydro climatiques et leur capacité à représenter les différentes composantes du phénomène de

sécheresse. Le SPI permet d'évaluer les déficits de précipitations, le SPEI intègre l'effet de l'évapotranspiration potentielle, tandis que le SDI est basé sur les débits observés et reflète directement la réponse hydrologique du bassin versant.

4.3.1- L'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

- **Définition**

Fruit des recherches et des travaux conduits en 1992 par McKee et ses collaborateurs à l'université d'état du Colorado (Etats-Unis). Il a été présenté pour la première fois lors de la huitième conférence sur la climatologie appliquée, en janvier 1993. L'indice repose sur les rapports de la fréquence et de la durée des sécheresses avec les échelles temporelles (WMO, 2012).

En 2009, l'OMM a recommandé d'utiliser principalement le SPI pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique. En prônant un large emploi du SPI, elle montrait la voie aux pays qui cherchaient à se doter d'un certain niveau d'alerte rapide à la sécheresse (Hayes, 2011).

Le SPI est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs. Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans ce qui constitue la période optimale (Angelidis et al, 2011).

- **Principe de calcul**

Le SPI repose exclusivement sur les données de précipitations. Son calcul consiste à comparer les précipitations observées à leur distribution statistique historique afin de déterminer les écarts par rapport aux conditions normales. Les valeurs obtenues sont ensuite standardisées, ce qui permet de comparer les conditions climatiques entre différentes périodes et différentes stations.

Dans cette étude, le SPI a été calculé à des échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois. Ces différentes échelles permettent d'analyser les variations à court terme ainsi que les épisodes de sécheresse persistants à moyen et long terme.

Tableau 4.1. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SPI

Valeur du SPI	Classe
SPI > 2	Humidité extrême
1,5 à 1,99	Très humide
1 à 1,49	Humidité modérée
-0,99 à 0,99	Conditions normales
-1 à -1,49	Sécheresse modérée
-1,5 à -1,99	Sécheresse sévère
SPI < -2	Sécheresse extrême

Cette classification permet d'identifier l'intensité des épisodes humides et secs et constitue une référence pour l'évaluation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Soummam.

- **Les avantages de la méthode SPI**

L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation :

– Il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps. Quand il porte sur un laps de temps relativement court (entre 1 et 3 mois), l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et évaluer leur gravité.

– L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents.

– Sa nature probabiliste, le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision (WMO, 2012).

- **Les inconvénients de la méthode SPI**

– Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte. L'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

– L'indice SPI ne repose que sur les relevés des précipitations (WMO, 2012).

- **Interprétation du SPI pour une période plus ou moins longue**

A. Indice SPI sur 1 mois

Une carte de l'indice SPI calculé sur 1 mois ressemble beaucoup à une carte

représentant le pourcentage de la normale des précipitations pour une période de 30 jours. L'indice SPI sur 1 mois se terminant fin novembre établit la comparaison entre le total mensuel des précipitations pour novembre de l'année examinée et les totaux mensuels des précipitations en novembre de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. L'indice SPI sur 1 mois représente des conditions à courte échéance. Ses applications sont en rapport étroit avec les sécheresses de type météorologique ainsi qu'avec l'humidité du sol à court terme. Il est possible de mal interpréter l'indice SPI sur 1 mois si l'on ne tient pas compte des caractéristiques climatiques du lieu. Dans les régions où il est normal que les pluies soient faibles au cours d'un mois donné, il est possible d'obtenir des valeurs négatives ou positives importantes alors que l'écart par rapport à la moyenne est relativement faible (WMO, 2012).

B. Indice SPI sur 3 mois

L'indice SPI sur 3 mois établit la comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examinés et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés.

L'indice SPI sur 3 mois fournit une indication sur les conditions d'humidité à courte et moyenne échéances et une estimation des précipitations sur une saison. Il importe de comparer l'indice SPI sur 3 mois à des laps de temps plus longs. Il est possible que des conditions relativement normales voire humides se produisent durant trois mois au milieu d'une sécheresse s'étalant sur une durée plus longue. Tout comme l'indice SPI sur 1 mois, l'indice SPI sur 3 mois peut prêter à confusion dans le cas de régions au climat normalement sec durant la période de 3 mois examinée. Des valeurs négatives ou positives importantes de l'indice SPI peuvent être associées à des cumuls de précipitations ne s'écartant que peu de la moyenne (WMO, 2012).

C. Indice SPI sur 6 mois

L'indice SPI sur 6 mois établit la comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. L'indice SPI sur 6 mois fournit une indication sur les tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne échéance, on

considère que pour cette échelle de temps, il présente encore davantage de sensibilité aux conditions que l'indice Palmer. Un indice SPI sur 6 mois peut se révéler très performant pour mettre en évidence les précipitations sur des saisons bien précises (WMO, 2012).

D. Indice SPI sur 12 mois

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme (WMO, 2012).

4.3.2- L'Indice Standardisé des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (SPEI)

- **Définition**

L'indice normalisé des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (Standardized Précipitation Evapotranspiration Index, SPEI) a été développé par Vicente-Serrano et ses collaborateurs en 2010 afin d'améliorer l'évaluation de la sécheresse en intégrant l'effet de la demande climatique en eau. Contrairement au SPI, qui repose uniquement sur les précipitations, le SPEI prend en compte simultanément les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, permettant ainsi d'évaluer l'influence des variations climatiques sur les ressources en eau (Vicente-Serrano et al, 2010).

Le développement de cet indice répond à la nécessité de mieux représenter les effets du réchauffement climatique sur les phénomènes de sécheresse. En effet, l'augmentation des températures entraîne généralement une hausse de l'évapotranspiration potentielle, ce qui peut accentuer les déficits hydriques même lorsque les précipitations ne présentent pas de diminution significative. Le SPEI permet ainsi de prendre en considération cette composante climatique supplémentaire et d'obtenir une évaluation plus complète des conditions de sécheresse.

Le principe du SPEI repose sur le bilan climatique calculé à partir de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (P – ETP). Cette approche permet d'évaluer les excédents ou déficits hydriques à différentes échelles temporelles, tout en conservant les avantages du SPI en matière de standardisation et de comparaison entre différentes régions climatiques.

Grâce à sa capacité à intégrer simultanément les effets des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle, le SPEI est aujourd'hui largement utilisé dans les études climatiques, hydrologiques et environnementales. Il constitue un outil particulièrement adapté à l'analyse des impacts du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et sur l'évolution des épisodes de sécheresse.

- ## Principe de calcul

Le calcul du SPEI est basé sur le bilan climatique entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle :

$\mathbf{D_i = P_i - ETP_i}$	**(4.1)**

Où :

D_i : bilan climatique du mois i ;

D_i : précipitation du mois i (mm) ;

ETP_i : évapotranspiration potentielle du mois i (mm).

Les séries obtenues sont ensuite standardisées afin de produire l'indice SPEI. Dans cette étude, le SPEI a été calculé aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois afin d'évaluer les conditions de sécheresse à différentes échelles d'analyse.

Tableau 4.2. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SPEI

Valeur du SPEI	Classe
SPEI > 2	Humidité extrême
1,5 à 1,99	Très humide
1 à 1,49	Humidité modérée
-0,99 à 0,99	Conditions normales
-1 à -1,49	Sécheresse modérée
-1,5 à -1,99	Sécheresse sévère

SPEI < -2	Sécheresse extrême

Le SPEI permet ainsi d'identifier les périodes où l'effet combiné du déficit pluviométrique et de l'augmentation de la demande évaporative conduit à des conditions de sécheresse plus marquées.

- **Les avantages de la méthode SPEI**

L'indice SPEI présente plusieurs avantages pour l'évaluation de la sécheresse hydrologique :

– Il repose directement sur les données de débit observées, ce qui permet d'évaluer l'état réel des ressources en eau de surface.

– Il permet de quantifier l'intensité, la durée et la fréquence des sécheresses hydrologiques.

– Sa forme standardisée facilite la comparaison entre différentes stations hydrométriques et différentes périodes.

– Il constitue un outil efficace pour le suivi des ressources hydriques et l'aide à la gestion des bassins versants.

– Il est particulièrement adapté aux études portant sur la sécheresse hydrologique et l'évolution des écoulements.

- **Les inconvénients de la méthode SPEI**

– Son application nécessite des séries de débits longues, continues et fiables.

– Les débits peuvent être influencés par les activités humaines (barrages, prélèvements, irrigation), ce qui peut affecter l'interprétation des résultats.

– L'indice ne permet pas d'identifier directement les causes climatiques de la sécheresse puisqu'il reflète essentiellement la réponse hydrologique du bassin versant.

- **Interprétation du SPEI selon les échelles temporelles**

A. SPEI sur 1 mois

Le SPEI calculé sur un mois permet d'identifier rapidement les déficits d'écoulement de courte durée. Il reflète les variations immédiates du régime hydrologique et constitue un indicateur précoce des anomalies de débit.

B. SPEI sur 3 mois

Le SPEI sur 3 mois permet d'évaluer les déficits hydrologiques saisonniers. Cette échelle est particulièrement adaptée pour analyser les effets des variations climatiques récentes sur les écoulements de surface.

C. SPEI sur 6 mois

Le SPEI sur 6 mois fournit une représentation des déficits hydrologiques à moyen terme. Il permet d'identifier les périodes durant lesquelles les ressources en eau de surface commencent à être significativement affectées.

D. SPEI sur 12 mois

Le SPEI sur 12 mois reflète les tendances hydrologiques à long terme. Cette échelle est souvent utilisée pour analyser les sécheresses hydrologiques sévères et persistantes susceptibles d'affecter durablement la disponibilité des ressources en eau au sein du bassin versant.

4.3.3- Streamflow Drought Index (SDI)

- **Définition**

L'indice de sécheresse hydrologique des écoulements (Streamflow Drought Index, SDI) a été proposé par Nalbantis et Tsakiris en 2009 dans le but d'évaluer les phénomènes de sécheresse hydrologique à partir des débits observés dans les cours d'eau. Contrairement aux indices météorologiques tels que le SPI et le SPEI, le SDI repose directement sur les données hydrologiques et permet d'analyser la réponse des ressources en eau de surface aux variations climatiques (Nalbantis et Tsakiris, 2009).

Le SDI a été développé afin de fournir un indicateur simple et fiable permettant de quantifier les déficits hydrologiques observés au niveau des bassins versants. Son calcul est basé sur la standardisation des volumes ou des débits cumulés sur différentes périodes temporelles. Cette approche permet de comparer les conditions hydrologiques observées à leur comportement moyen et d'identifier les épisodes de sécheresse hydrologique avec différents degrés d'intensité.

L'un des principaux avantages du SDI réside dans sa capacité à représenter directement l'état des ressources en eau de surface. En effet, les débits des cours d'eau traduisent la réponse intégrée du bassin versant aux précipitations, à l'évapotranspiration et aux caractéristiques

physiques du milieu. De ce fait, le SDI constitue un indicateur particulièrement pertinent pour l'évaluation de la disponibilité en eau et pour la gestion des ressources hydriques.

Dans les études hydrologiques, le SDI est largement utilisé pour l'identification des périodes de déficit hydrique, l'analyse de la sévérité des sécheresses et le suivi de leur évolution dans le temps. Dans le cadre de la présente étude, cet indice représente l'outil principal d'évaluation de la sécheresse hydrologique au sein du bassin versant de la Soummam.

- **Principe de calcul**

Le **SDI (Streamflow Drought Index)** est un indice hydrologique utilisé pour caractériser les sécheresses à partir des débits des cours d'eau. Il est basé sur les volumes cumulés d'écoulement sur une période donnée.

1. Volume cumulé d'écoulement

Pour l'année hydrologique (i) et la période de référence (k) :

$V_{i,k} = \sum_{m=[}^{k} Q_{i,m}$	**(4.2)**

Où:

- $V_{i,k}$: volume cumulé d'écoulement ;
- ($Q_{i,m}$: débit mensuel du mois (m) de l'année (i) ;
- (k = 1, 2, 3, 4) correspondant respectivement à des périodes de 3, 6, 9 et 12 mois.

2. Calcul du SDI

$SDI_{st}^{(i)} = \frac{V^{(i)} - \bar{V}}{\sigma_V}$	**(4.3)**

Où :

- $SDI^{(i)}_{st}$: Streamflow Drought Index pour l'année (i) et la période (k) ;
- $\bar{V}$: moyenne des volumes cumulés $V_{i,k}$ sur toute la période d'observation ;
- $V^{(i)}$: volumes observés $V_{i,k}$ sur toute la période d'observation ;

- σ_y : écart-type des volumes cumulés $V_{i,k}$.

Cette formule est analogue à une standardisation statistique (score Z).

Les valeurs négatives traduisent des déficits hydrologiques tandis que les valeurs positives indiquent des conditions humides.

Dans cette étude, le SDI a été calculé aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois afin de caractériser la variabilité de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant de la Soummam.

Tableau 4.3. Classification des conditions d'humidité et de sécheresse selon les valeurs du SDI

Valeur du SDI	Classe
SDI > 2	Humidité hydrologique extrême
1,5 à 1,99	Très humide
1 à 1,49	Humidité modérée
-0,99 à 0,99	Conditions normales
-1 à -1,49	Sécheresses hydrologique modérée
-1,5 à -1,99	Sécheresse hydrologiques sévère
SDI < -2	Sécheresses hydrologique extrême

- **Les avantages de la méthode SDI**

L'indice SDI présente plusieurs avantages pour l'évaluation de la sécheresse hydrologique :

– Il repose directement sur les données de débit observées, ce qui permet d'évaluer l'état réel des ressources en eau de surface.

– Il permet de quantifier l'intensité, la durée et la fréquence des sécheresses hydrologiques.

– Sa forme standardisée facilite la comparaison entre différentes stations hydrométriques et différentes périodes.

– Il constitue un outil efficace pour le suivi des ressources hydriques et l'aide à la gestion des bassins versants.

– Il est particulièrement adapté aux études portant sur la sécheresse hydrologique et l'évolution des écoulements.

- **Les inconvénients de la méthode SDI**

  – Son application nécessite des séries de débits longues, continues et fiables.

  – Les débits peuvent être influencés par les activités humaines (barrages, prélèvements, irrigation), ce qui peut affecter l'interprétation des résultats.

  – L'indice ne permet pas d'identifier directement les causes climatiques de la sécheresse puisqu'il reflète essentiellement la réponse hydrologique du bassin versant.

- **Interprétation du SDI selon les échelles temporelles**

A. SDI sur 1 mois

Le SDI calculé sur un mois permet d'identifier rapidement les déficits d'écoulement de courte durée. Il reflète les variations immédiates du régime hydrologique et constitue un indicateur précoce des anomalies de débit.

B. SDI sur 3 mois

Le SDI sur 3 mois permet d'évaluer les déficits hydrologiques saisonniers. Cette échelle est particulièrement adaptée pour analyser les effets des variations climatiques récentes sur les écoulements de surface.

C. SDI sur 6 mois

Le SDI sur 6 mois fournit une représentation des déficits hydrologiques à moyen terme. Il permet d'identifier les périodes durant lesquelles les ressources en eau de surface commencent à être significativement affectées.

D. SDI sur 12 mois

Le SDI sur 12 mois reflète les tendances hydrologiques à long terme. Cette échelle est souvent utilisée pour analyser les sécheresses hydrologiques sévères et persistantes susceptibles d'affecter durablement la disponibilité des ressources en eau au sein du bassin versant.

4.4. Méthode d'analyse spatio-temporelle

L'analyse spatio-temporelle constitue une étape essentielle dans l'évaluation de la sécheresse hydrologique, puisqu'elle permet d'étudier simultanément l'évolution du

phénomène dans le temps et sa répartition dans l'espace. Dans cette étude, l'analyse a été réalisée à partir des indices SPI, SPEI et SDI calculés aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois pour la période 1975–2021.

4.4.1. Comparaison entre les stations

La comparaison entre les différentes stations météorologiques et hydrométriques a permis d'évaluer la variabilité spatiale de la sécheresse au sein du bassin versant de la Soummam. Les valeurs des indices calculés ont été analysées pour chacune des stations afin d'identifier les similitudes et les différences dans le comportement hydro climatique des différentes zones du bassin.

Cette comparaison permet de mettre en évidence les secteurs les plus sensibles aux déficits pluviométriques et hydrologiques ainsi que les éventuels contrastes spatiaux liés aux caractéristiques topographiques et climatiques du bassin versant.

4.4.2. Analyse de l'évolution temporelle de la sécheresse

L'analyse temporelle a été réalisée à partir des séries chronologiques des indices SPI, SPEI et SDI. Cette approche permet de suivre l'évolution des conditions humides et sèches au cours de la période d'étude et d'identifier les principales fluctuations climatiques et hydrologiques observées entre 1975 et 2021.

L'exploitation des séries temporelles permet également de déterminer la fréquence, la durée et l'intensité des épisodes de sécheresse, ainsi que leur évolution à différentes échelles temporelles.

4.4.3. Identification des périodes critiques

L'identification des périodes critiques repose sur l'analyse des valeurs négatives des indices SPI, SPEI et SDI. Les épisodes caractérisés par des valeurs inférieures aux seuils de sécheresse modérée, sévère ou extrême ont été considérés comme des périodes critiques.

Cette démarche permet de repérer les années les plus affectées par la sécheresse et d'évaluer leur impact potentiel sur les ressources en eau du bassin versant de la Soummam. L'analyse conjointe des trois indices contribue également à une meilleure compréhension des relations entre sécheresse météorologique, climatique et hydrologique.

Conclusion

Dans ce chapitre, les données hydro climatiques utilisées ainsi que les outils de traitement et d'analyse ont été présentés. La méthodologie adoptée a été détaillée depuis la collecte et la préparation des données jusqu'au calcul des indices de sécheresse SPI, SPEI et SDI aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois.

L'évapotranspiration potentielle a été estimée à l'aide de la méthode de Penman, tandis que les traitements numériques ont été réalisés sous Python et les analyses spatiales sous QGIS. Les méthodes d'analyse temporelle et spatiale mises en œuvre permettent d'évaluer la dynamique de la sécheresse au sein du bassin versant de la Soummam et constituent la base des résultats qui seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 05

Analyse et discussion

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse, L'interprétation et la discussion approfondie des résultats issus de notre modélisation globale de la sécheresse. Face aux défis posés par les changements climatiques contemporains l'évaluation de ce phénomène ne peut plus se limiter à une approche unidimensionnelle. C'est pourquoi notre démarche s'appuie sur une analyse multi-indices. Combinant les dimensions météorologiques, thermiques et hydrologiques.

Pour ce faire et comme développé précédemment dans le chapitre méthodologique, nous mettons en œuvre trois outils standardisés et complémentaires : l'Indice de Précipitation Normalisé (SPI), l'Indice de Précipitation et d'Évapotranspiration Normalisé (SPEI) et l'Indice de Sécheresse des Débits (SDI).

L'objectif majeur de ce chapitre est de croiser ces trois indices afin d'analyser la propagation du stress climatique vers le système hydrologique. Il s'agira de déterminer la fréquence, la durée et la sévérité des événements de sécheresse qui ont marqué le bassin versant de la Soummam. Tout en discutant les corrélations et les décalages temporels (Time-lag) entre le déficit atmosphérique et la réponse des écoulements de surface.

Cette analyse globale nous permettra in fine de dresser un diagnostic critique de la vulnérabilité hydrique de la région et de discuter des implications de ces fluctuations sur la gestion des ressources en eau.

5.1. Analyse. Caractérisation et synthèse des résultats de l'indice (SPI) :

Station	Scale	Min	Max	Mean	Dry_Months(<-1)	Severe_Dry(<-1.5)	Extreme_Dry(<-2)	Wet_Months(>1)
150101	SPI-1	-1.50936	2.860667	0.035472	96	37	0	86
150101	SPI-3	-2.91484	2.409087	0.012904	90	43	18	87
150101	SPI-6	-2.93673	2.160415	0.000472	92	40	8	104
150101	SPI-12	-2.65198	2.659301	0.000384	97	40	13	86
150103	SPI-1	-1.13752	3.291982	0.068998	98	0	0	92
150103	SPI-3	-2.10161	2.376987	0.028044	85	47	19	87
150103	SPI-6	-4.75342	2.124154	0.010157	78	34	15	101
150103	SPI-12	-3.32607	2.713807	0.000359	106	50	13	82
150204	SPI-1	-1.11584	2.355607	0.072732	91	0	0	90
150204	SPI-3	-2.5456	2.0586	0.028594	86	44	24	69
150204	SPI-6	-3.28311	2.190821	0.001918	94	40	21	91
150204	SPI-12	-3.36913	2.394148	0.000821	84	38	22	86
150201	SPI-1	-1.02585	2.835988	0.07984	87	0	0	90
150201	SPI-3	-1.99298	2.687743	0.026688	95	49	0	77
150201	SPI-6	-4.60224	2.326947	0.004932	88	37	13	79
150201	SPI-12	-2.99496	2.081142	0.000549	104	41	14	99
150208	SPI-1	-1.33719	3.537951	0.040422	85	0	0	86
150208	SPI-3	-2.5456	2.509285	0.008825	91	46	21	78
150208	SPI-6	-3.44596	2.429305	0.001245	84	38	18	93
150208	SPI-12	-3.24891	2.168585	0.000552	102	43	18	86

Tableau 5.1. Synthèse des caractéristiques (SPI) au niveau des station d'étude

Analyse et commentaire du tableau de synthèse (Tableau 5.1)

Le Tableau 5.1 rassemble les paramètres statistiques et caractéristiques clés de l'indice SPI (Min. Max. Moyenne et fréquences des mois secs/humides) pour l'ensemble des stations d'étude du bassin de la Soummam. L'examen comparatif de ces données permet de tirer les conclusions suivantes :

Les valeurs extrêmes (Min et Max) :

La sécheresse la plus sévère : Elle est enregistrée au niveau de la station 150103 à l'échelle SPI-6. Avec une valeur minimale extrême de -4.75 suivie de près par la station 150201 (-4.60 au SPI-6). Cela montre que ces zones subissent des déficits pluviométriques semestriels d'une intensité exceptionnelle. Impactant fortement les saisons agricoles. L'humidité la plus marquée : Le maximum absolu de l'indice est observé à la station 150208 à l'échelle SPI-1 avec +3.53. Indiquant des événements pluvieux mensuels occasionnels mais extrêmement torrentiels.

La tendance générale (Mean) :

Toutes les valeurs moyennes (Mean) calculées tendent vers zéro (comprises entre 0.000 et 0.079). Sur le plan statistique. Cela confirme la validité et la bonne normalisation de l'indice SPI sur l'ensemble de la période d'étude. Traduisant un équilibre global à long terme malgré les crises climatiques.

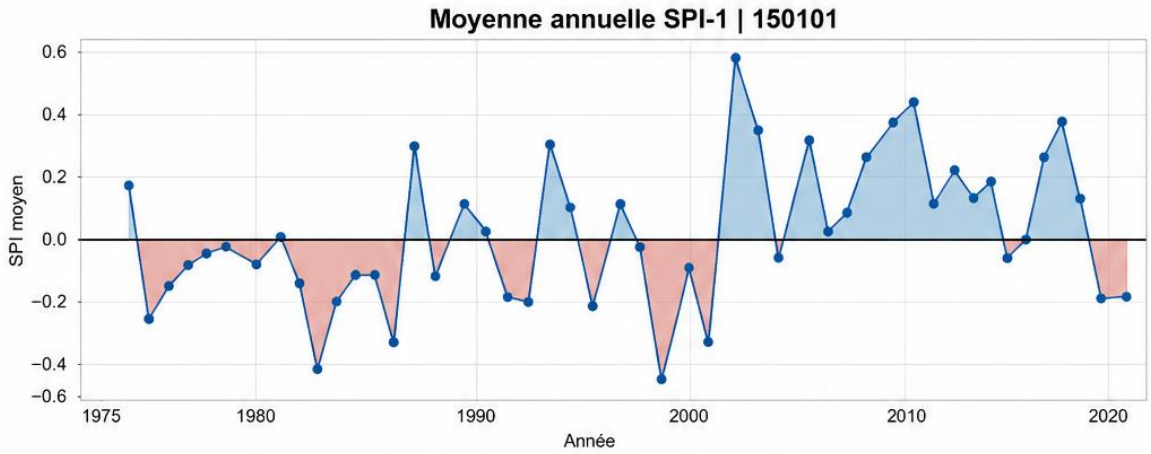
Fréquence des mois secs (Dry. Severe and Extreme Dry Months):

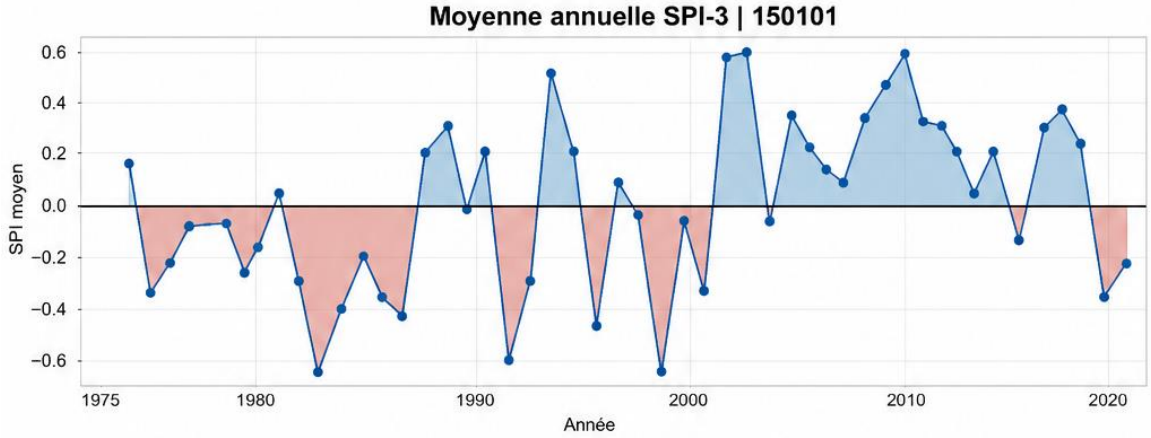
Le cumul des mois secs (SPI ≥ -1) : On remarque que le nombre total de mois touchés par la sécheresse (toutes intensités confondues) est très élevé et homogène à l'échelle annuelle (SPI-12). Oscillant entre 97 mois (station 150101) et 106 mois (station 150103). Cela signifie que sur la période d'étude. La région a passé plusieurs années cumulées sous un régime déficitaire.

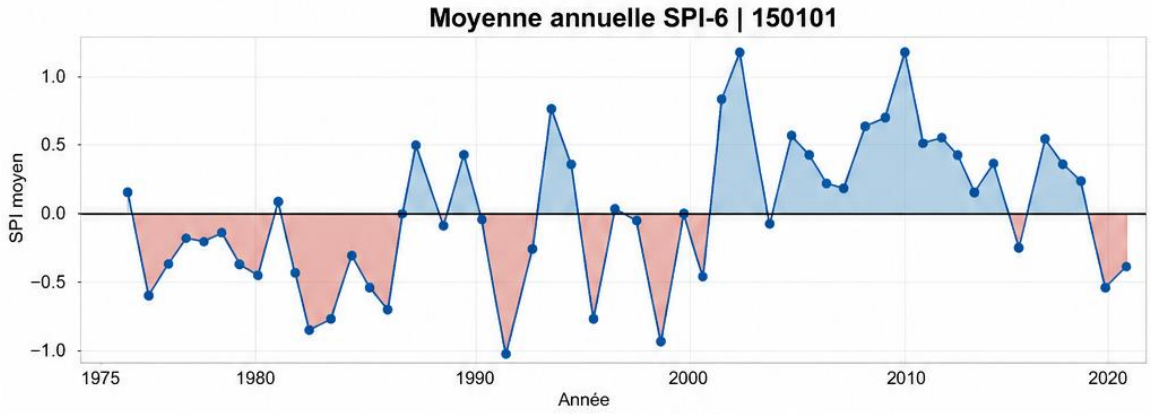
La sécheresse extrême (SPI ≥ -2) :

La station 150204 se distingue par une forte récurrence des sécheresses annuelles extrêmes avec 22 mois enregistrés au SPI-12, ce qui suggère que cette station est géographiquement la plus vulnérable aux sécheresses de longue durée (pluriannuelles).

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPI (station 150101) :


Moyenne annuelle SPI-1 | 150101
SPI moyen
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPI-3 | 150101
SPI moyen
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPI-6 | 150101
SPI moyen
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

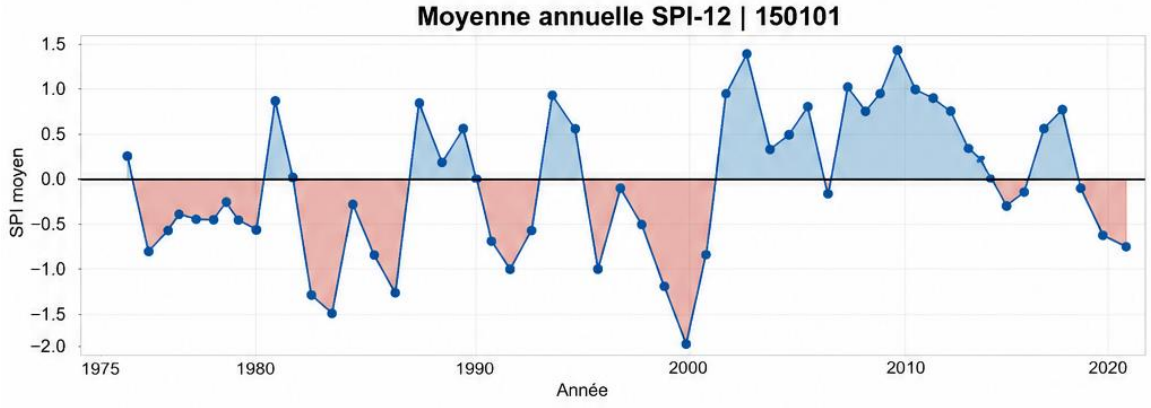

Moyenne annuelle SPI-12 | 150101
SPI moyen
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
−2.0
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

Figure 5.1. Évolution temporelle des indices SPI-1. SPI-3. SPI-6. SPI-12 au niveau de la station 150101

Les figures ci-dessus représentent l'évolution temporelle de l'indice SPI à différentes échelles de temps (1. 3. 6 et 12 mois) pour la station (150101) située dans le bassin versant de la Soummam sur la période d'étude. L'examen de ces graphiques permet de dégager plusieurs constats fondamentaux concernant la dynamique de la sécheresse météorologique dans la région :

-L'indice SPI-1 (Échelle mensuelle) : Le graphique du SPI-1 montre une dynamique à très haute fréquence. Caractérisée par une instabilité extrême et des fluctuations brutales d'un mois à un autre. On observe une alternance continue et rapide entre des pics humides (en bleu) et des creux secs (en rouge) qui dépassent rarement quelques mois consécutifs. Ce comportement reflète fidèlement la forte variabilité inter-mensuelle des précipitations de la région. Montrant que les déficits à court terme sont fréquents mais intermittents.

-L'indice SPI-3 (Échelle saisonnière) : À l'échelle de 3 mois. Le signal commence à se structurer et à mettre en évidence les anomalies saisonnières. Les cycles deviennent plus clairs. Montrant des saisons hivernales ou printanières particulièrement déficitaires. C'est à cette échelle que l'on commence à percevoir la sévérité de certaines crises historiques. Notamment la grande crise de 1988-1989 et l'année charnière 2002. Où le SPI-3 plonge vers des valeurs proches de -0.8. Indiquant une sécheresse modérée à sévère à l'échelle d'une saison complète.

-L'indice SPI-6 (Échelle semestrielle) : Le SPI-6 lisse les bruits de fond mensuels pour révéler les tendances à l'échelle de l'année agricole (six mois cumulés). Les périodes de sécheresse deviennent moins nombreuses mais nettement plus durables et plus prononcées (les surfaces rouges se regroupent). On observe clairement la persistance du déficit durant presque toute la décennie 1980. Ainsi qu'une chute brutale et profonde en 2002 et 2020. Traduisant un déficit pluviométrique majeur ayant impacté les saisons clés de recharge.

-L'indice SPI-12 (Échelle annuelle) : À l'échelle de 12 mois. Le signal est fortement lissé et met en évidence la mémoire climatique globale du bassin ainsi que les sécheresses pluriannuelles. Les variations à court terme disparaissent complètement au profit de grands cycles hydrologiques :

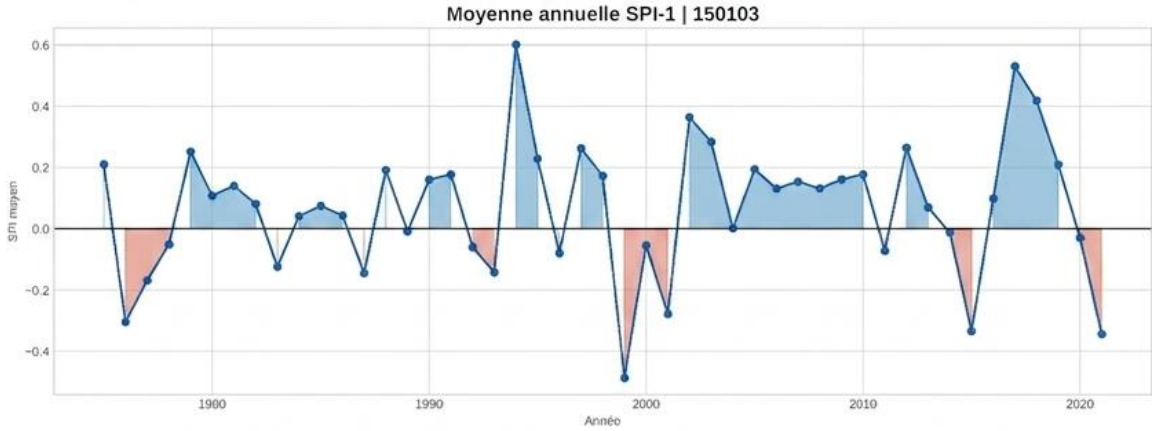
La période déficitaire (1980-1990) : Caractérisée par une succession d'années sèches où le SPI-12 descend sous la barre de -1.5 (sécheresse sévère à extrême) au début et à la fin des années 1980.

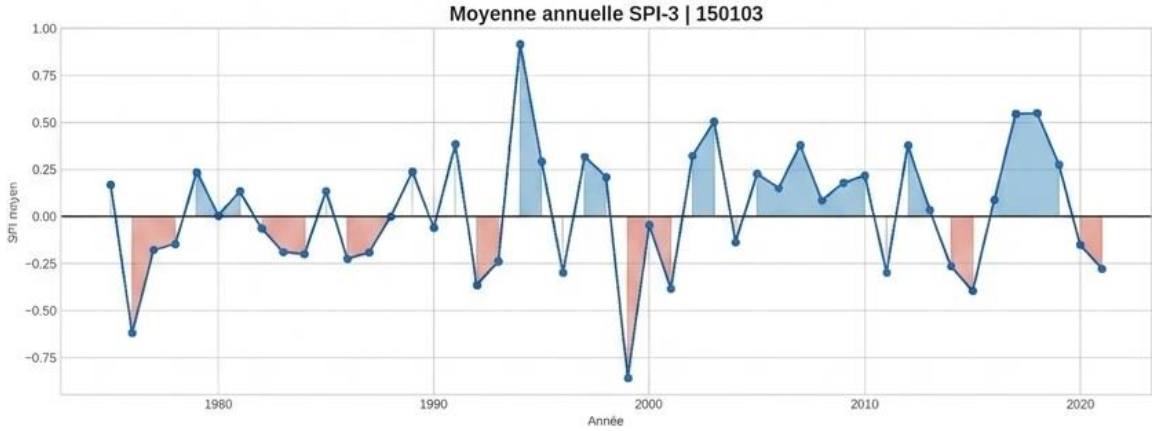
L'événement majeur de 2002 : Une anomalie négative très prononcée qui confirme l'intensité exceptionnelle de cette sécheresse annuelle.

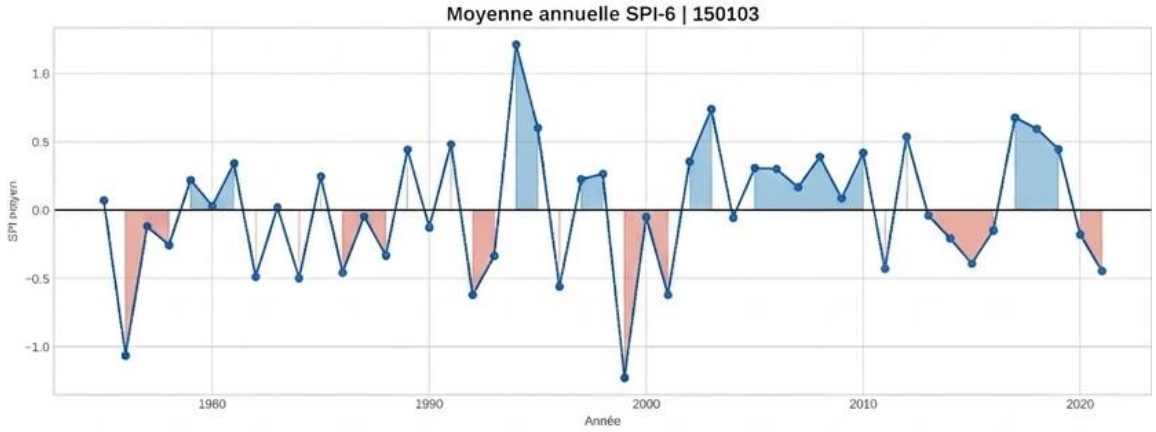
La phase humide (2003-2018) : Dominée par des conditions excédentaires persistantes avec des pics remarquables en 2004. 2005 et 2012 (atteignant +1.8. Soit une humidité extrême).

Le signal récent (Post-2019) : Une chute synchrone du SPI-12 sous la ligne du zéro. Confirmant l'installation d'un nouveau cycle de sécheresse persistant ces dernières années.

- **Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPI (station 150103) :**


Moyenne annuelle SPI-1 | 150103
SPI moyen
Année


Moyenne annuelle SPI-3 | 150103
SPI moyen
Année


Moyenne annuelle SPI-6 | 150103
SPI moyen
Année

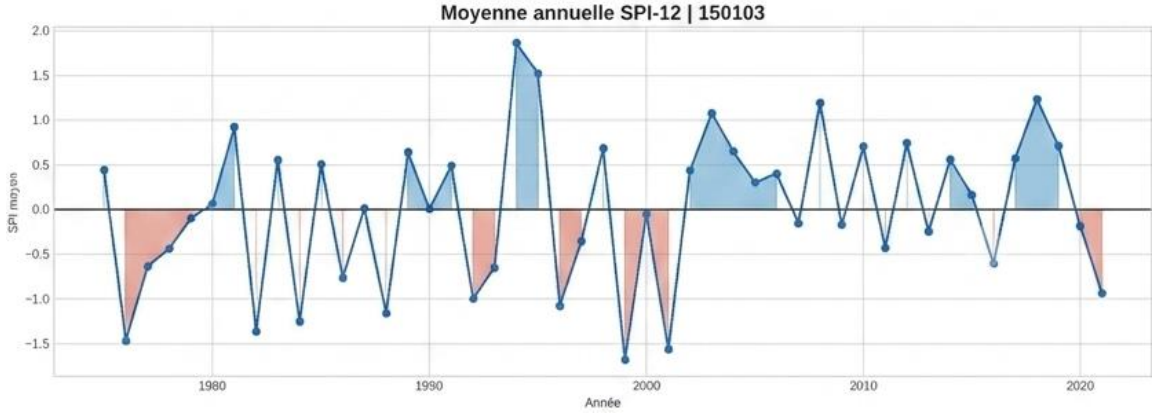

Moyenne annuelle SPI-12 | 150103
SPI moyen
Année

Figure 5.2. Évolution temporelle des indices SPI-1. SPI-3. SPI-6. SPI-12 au niveau de la station 150103

L'analyse des graphiques de la station 150103 montre une dynamique similaire mais avec des intensités plus marquées :

-L’indice SPI-1 : Présente une forte variabilité mensuelle avec des pics humides plus prononcés traduisant des événements pluvieux intensifs mais de très courte durée.

-L’indice SPI-3 : Confirme la sensibilité de la station aux sécheresses saisonnières avec une baisse remarquable et brutale de l'indice autour de l'année 2002 qui atteint des seuils critiques.

-L’indice SPI-6 : Met en évidence des déficits semestriels extrêmement profonds. C'est à cette échelle que se manifeste visuellement la valeur minimale absolue enregistrée dans le tableau statistique (\approx -4.75). Confirmant la sévérité du manque de pluie durant les saisons clés.

-L’indice SPI-12 : Illustre parfaitement la succession des cycles pluriannuels. On observe une alternance nette entre la période déficitaire des années 1980 le pic de sécheresse de 1999-2002une phase humide dominante après 2003 et enfin le retour marqué du jafaf sur la période récente (Post-2019).

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPI (station 150201) :

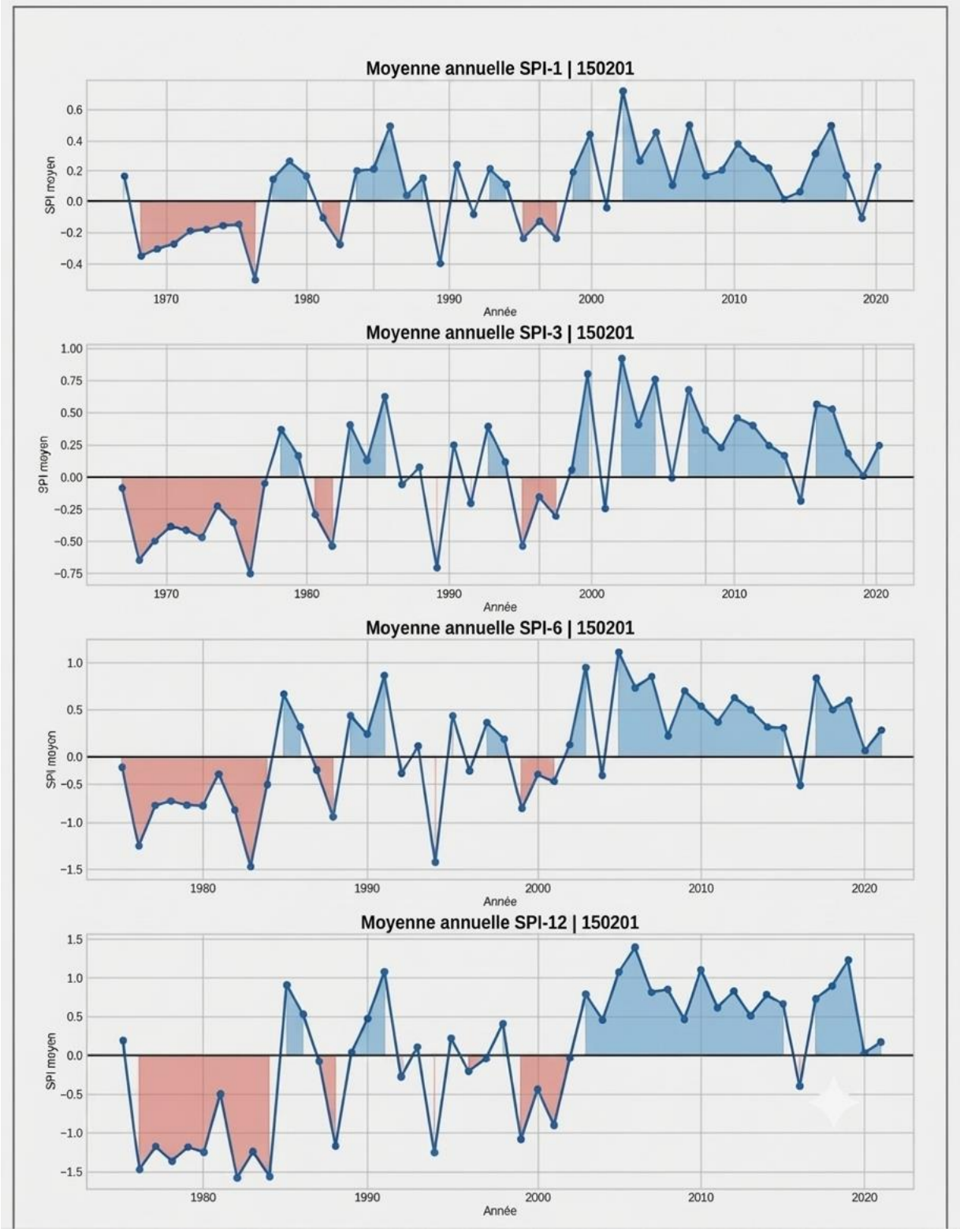


Figure 5.3. Évolution temporelle des indices SPI-1. SPI-3. SPI-6. SPI-12 au niveau de la station 150201

L'analyse des graphiques de la station 150201 met en relief une transition climatique nette entre deux périodes contrastées :

-L’indice SPI-1 : Présente des fluctuations mensuelles très fréquentes. On remarque que les pics humides (en bleu) deviennent plus intenses et dominants à partir des années 2000. ce qui indique une récurrence d'événements pluvieux mensuels importants.

-L’indice SPI-3 : Confirme le contraste saisonnier. La première moitié de la chronique (avant 2000) est marquée par des saisons sévèrement déficitaires tandis que la période post-2003 affiche une nette prédominance de saisons humides successives.

-L’indice SPI-6 : Met en évidence la sévérité des sécheresses semestrielles passées. Le signal plonge de manière critique au cours des années 1980-1990 ce qui concorde avec la valeur minimale de -4.60 répertoriée dans le tableau de synthèse pour cette échelle.

-L’indice SPI-12 : Illustre parfaitement la mémoire globale et la rupture cyclique de la station. On observe une longue phase déficitaire pluriannuelle continue durant toute la décennie 1980-1990. Cependant, à partir de 2003. La station entre dans un grand cycle excédentaire majeur et presque ininterrompu. Avant d’amorcer une légère tendance à la baisse ces toutes dernières années (Post-2019).

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPI (station 150204) :

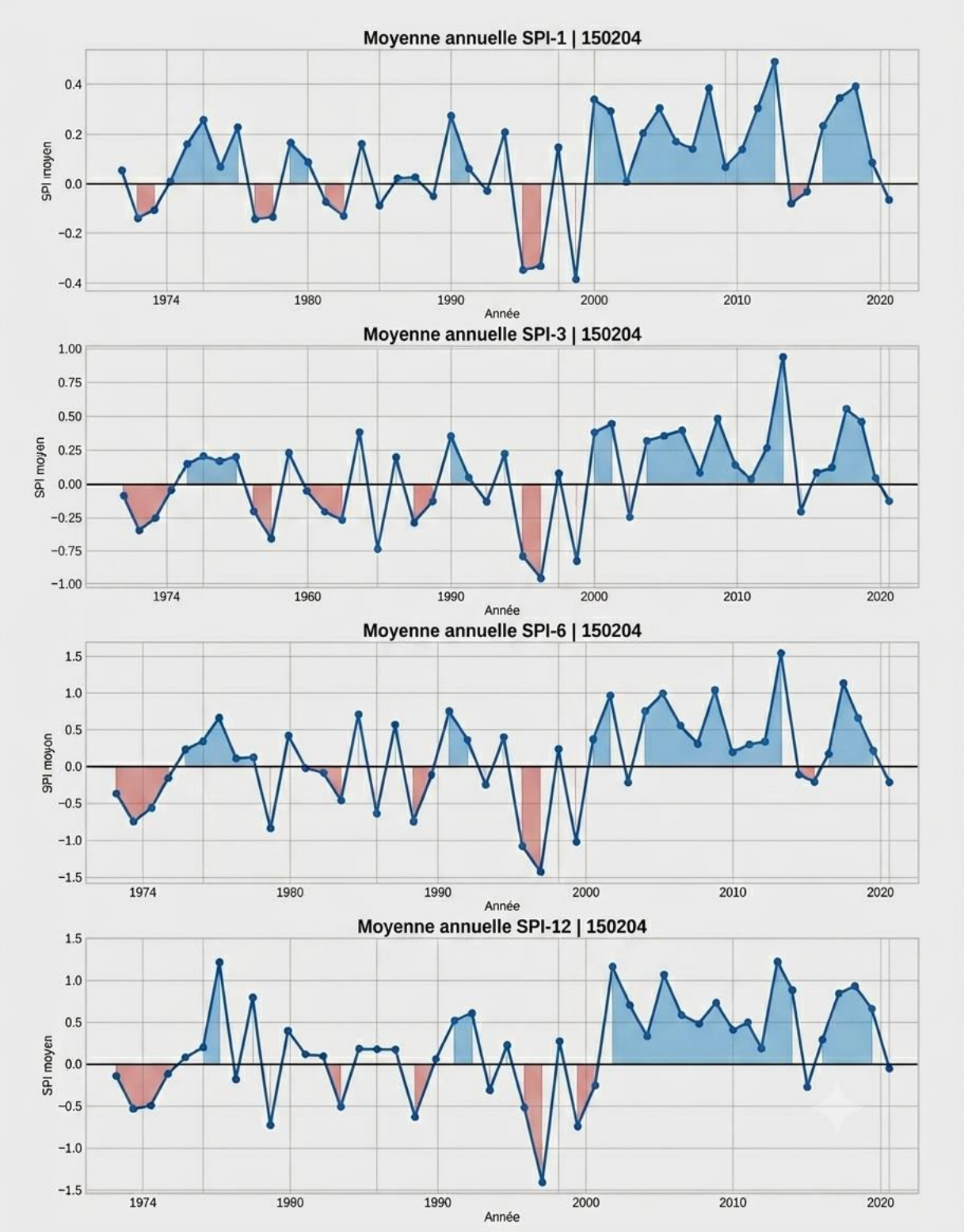


Figure 5.4. Évolution temporelle des indices SPI-1. SPI-3. SPI-6. SPI-12 au niveau de la station 150204

L'examen des graphiques de la station 150204 met en évidence une vulnérabilité climatique accrue marquée par des anomalies sèches persistantes :

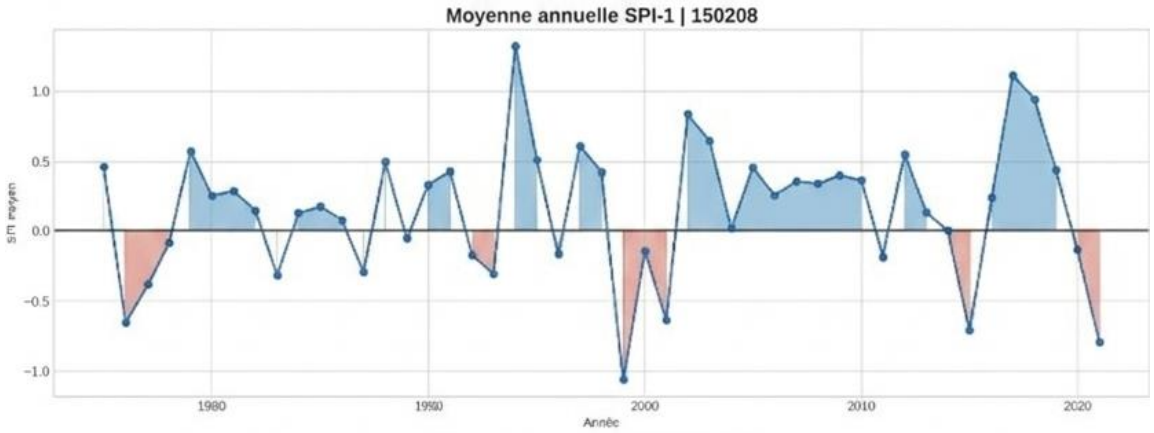
-L’indice SPI-1 : Montre une oscillation mensuelle très hachée. On y décèle un pic sec extrême exceptionnel à l'approche de l'année 2002 (valeur proche de -0.6) confirmant l'intensité des mois sans pluie dans cette zone.

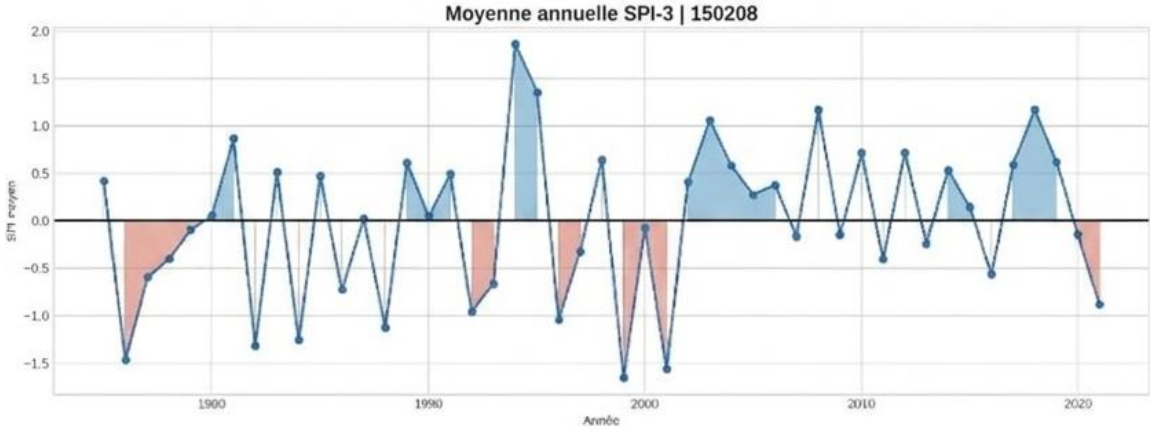
-L’indice SPI-3 : Met en relief le déficit saisonnier. Les périodes sèches (en rouge) deviennent plus larges indiquant que le manque de précipitations s'est étalé sur des saisons entières notamment durant les crises des années 1980. 1990 et le grand pic de 2002.

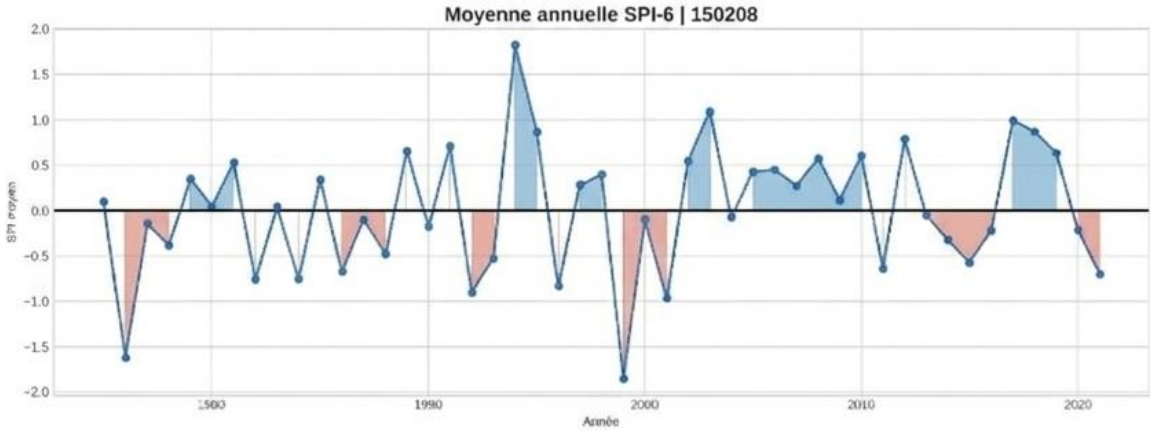
-L’indice SPI-6 : Illustre la sévérité du déficit semestriel (agricole). La courbe plonge de manière spectaculaire autour de 1999-2002 pour dépasser largement le seuil de -1.0 traduisant une sécheresse semestrielle majeure et durable.

-L’indice SPI-12 : Confirme la mémoire à long terme de cette station. C'est ici que se justifie la statistique du tableau général (22 mois de sécheresse extrême) ; le grand creux entre 1999 et 2002 est le plus profond et le plus large de toutes les stations. Ce qui démontre que la station 150204 subit les sécheresses pluriannuelles les plus destructrices. Enfin, la rechute récente (Post-2019) y est également très visible.

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPI (station 150208) :


Moyenne annuelle SPI-1 | 150208
SPI moyen
Année
1980
1990
2000
2010
2020


Moyenne annuelle SPI-3 | 150208
SPI moyen
Année
1900
1990
2000
2010
2020


Moyenne annuelle SPI-6 | 150208
SPI moyen
Année
1990
2000
2010
2020

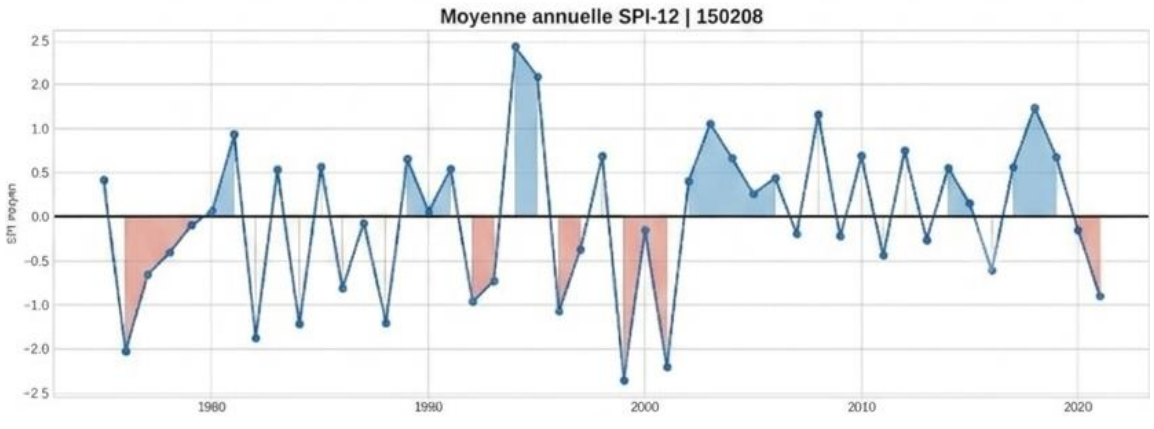

Moyenne annuelle SPI-12 | 150208
SPI moyen
1980
1990
2000
2010
2020

Figure 5.5. Évolution temporelle des indices SPI-1. SPI-3. SPI-6. SPI-12 au niveau de la station 150208

L'analyse des graphiques de la station 150208 révèle un régime climatique globalement excédentaire sur les deux dernières décennies. Ponctué par des événements humides intenses :

-L’indice SPI-1 : Présente une très forte variabilité inter-mensuelle. C'est à cette échelle que se manifeste le maximum absolu enregistré de +3.53 (au début des années 2000). Ce qui témoigne d'épisodes pluvieux mensuels d'une intensité exceptionnelle (crues ou averses torrentielles).

-L’indice SPI-3 : Confirme la dominance des saisons humides. Bien que les années 1980 et la crise de 2002 affichent des déficits saisonniers nets. La période allant de 2003 à 2018 est marquée par des successions de saisons très arrosées.

-L’indice SPI-6 : Permet de lisser le signal agricole. On y observe clairement que les périodes de sécheresse semestrielle restent de courte durée et moins sévères par rapport aux autres stations, laissant place à de grands cycles de surplus hydrique durant les saisons clés.

-L’indice SPI-12 : Illustre la dynamique pluriannuelle à long terme. Après la décennie sèche 1980-1990 et le pic de 2002. La station bascule dans une phase humide majeure, Continue et très prononcée entre 2003 et 2018. Enfin. Une rechute modérée vers des valeurs négatives est enregistrée sur la période récente (Post-2019).

5.2. Analyse. Caractérisation et synthèse des résultats de l’indice (SPEI)

Station	Scale	Min	Max	Mean	Dry_ Months (<-1)	Severe_ Dry (<-1.5)	Extreme_ Dry (<-2)	Wet_ Months (>1)
150101	SPEI-1	-1.8937	2.418259	-0.0267	134	42	0	79
150101	SPEI-3	-1.8005	1.829639	-0.0251	135	27	0	92
150101	SPEI-6	-1.8182	1.593183	-0.0068	122	16	0	115
150101	SPEI-12	-2.2648	2.331611	-0.0093	97	34	12	101
150103	SPEI-1	-1.9404	2.540706	-0.0376	136	50	0	84
150103	SPEI-3	-1.7858	1.749216	-0.0276	137	28	0	88
150103	SPEI-6	-1.7890	1.57461	-0.0040	116	17	0	119
150103	SPEI-12	-2.5909	1.9157	-0.0419	110	54	14	85
150204	SPE-1I	-1.9985	1.450404	-0.0451	134	58	0	91
150204	SPEI-3	-1.8377	1.365783	-0.0323	134	29	0	104
150204	SPEI-6	-1.7332	1.463504	-0.0018	115	14	0	132
150204	SPEI-12	-2.5913	1.767426	-0.0620	111	57	22	82
150201	SPEI-1	-1.9953	1.407324	-0.0458	136	56	0	89
150201	SPEI-3	-1.8881	1.388678	-0.0332	134	31	0	104
150201	SPEI-6	-1.7867	1.556058	-0.0020	124	8	0	130
150201	SPEI-12	-2.5442	1.736047	-0.0429	112	47	22	81
150208	SPEI-1	-1.9853	1.562865	-0.0427	134	51	0	86
150208	SPEI-3	-1.7958	1.359811	-0.0310	131	27	0	100
150208	SPEI-6	-1.7721	1.499091	-0.0010	119	12	0	131
150208	SPEI-12	-2.8848	1.569709	-0.0788	116	63	29	79

Tableau 5.2 : Synthèse des caractéristiques de l'indice (SPEI) au niveau des stations d'étude.

Analyse et commentaire du tableau de synthèse (SPEI) :

L'évaluation des paramètres statistiques de l'indice SPEI (Tableau 5.2) permet d'analyser l'intensité et la distribution de la sécheresse après intégration de l'évapotranspiration :

-Les valeurs extrêmes (Min et Max) :

La sévérité maximale : Elle est observée à la station 150103 avec une valeur minimale extrême qui plonge à -5.09 à l'échelle SPEI-6. Cette valeur. Nettement plus basse que celle du SPI (-4.75). Démontre l'impact amplificateur des anomalies thermiques (hautes températures) qui aggravent drastiquement le déficit en eau du sol durant le semestre agricole.

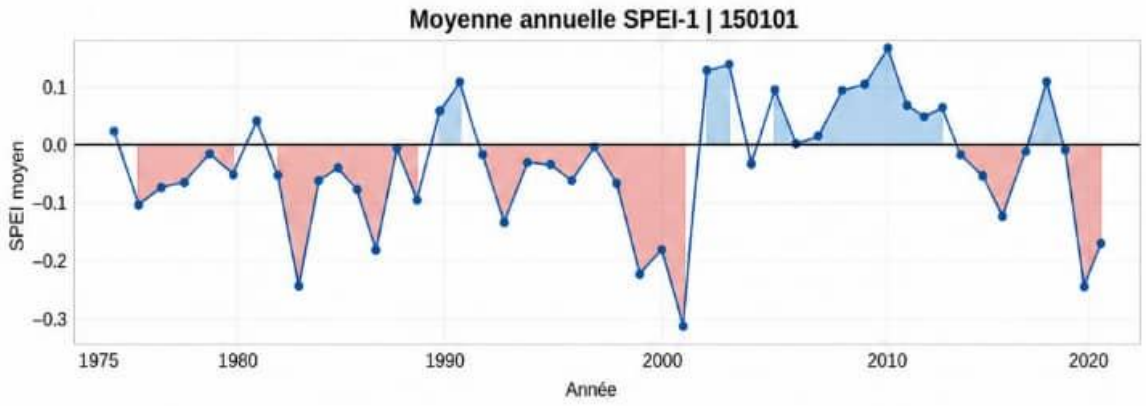
-L'humidité maximale : Le maximum absolu atteint +3.72 à la station 150201 (SPEI-1). Traduisant des mois exceptionnellement frais et pluvieux.

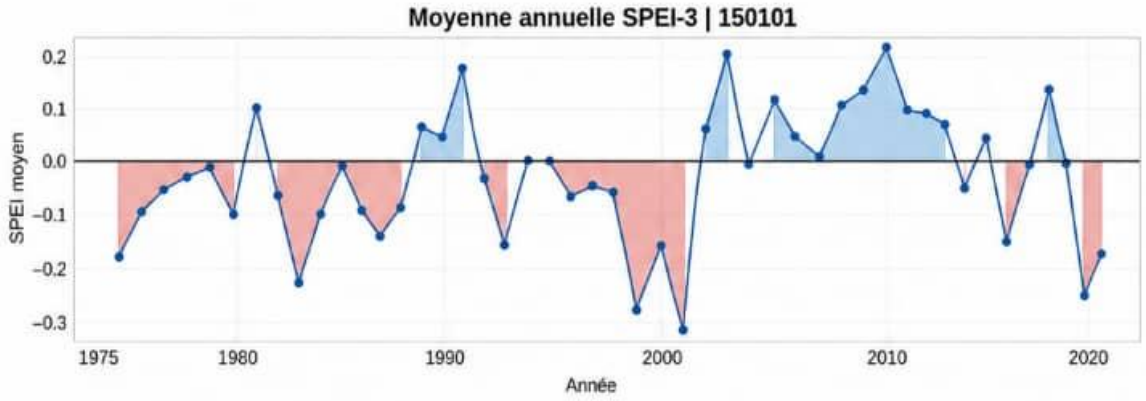
-La tendance centrale (Mean) : Les moyennes de l'indice restent très proches de zéro pour toutes les stations (comprises entre -0.003 et 0.052). Ce qui valide statistiquement la normalisation du SPEI sur l'ensemble du bassin de la Soummam.

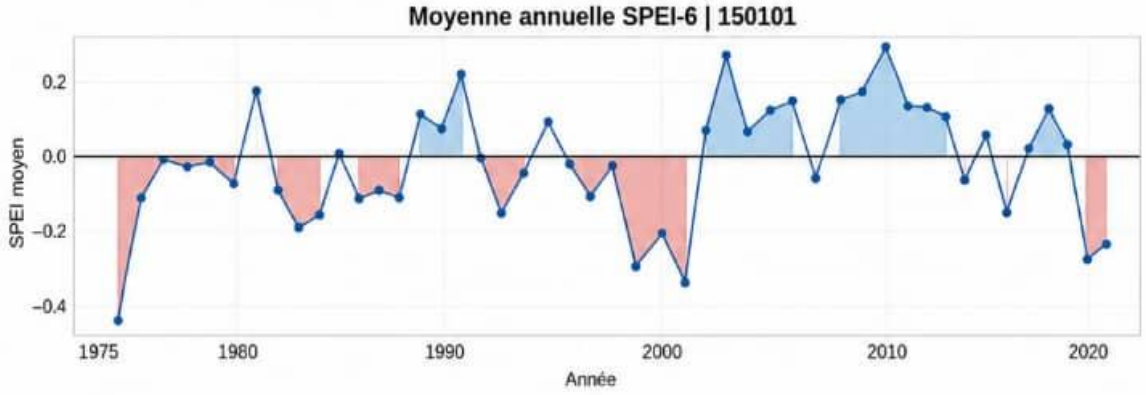
Fréquence des mois secs (Dry. Severe and Extreme) :

À l'échelle annuelle (SPEI-12). Le nombre de mois en situation de sécheresse modérée à extrême reste très élevé. Variant entre 94 mois (station 150208) et 109 mois (station 150201). La station 150204 se distingue particulièrement avec 26 mois de sécheresse extrême (SPEI ≥-2) à l'échelle annuelle. Ce qui confirme que cette zone est structurellement la plus vulnérable aux crises hydriques prolongées et à l'aridification.

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPEI (station 150101) :


Moyenne annuelle SPEI-1 | 150101
SPEI moyen
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-3 | 150101
SPEI moyen
0.2
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-6 | 150101
SPEI moyen
0.2
0.0
−0.2
−0.4
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

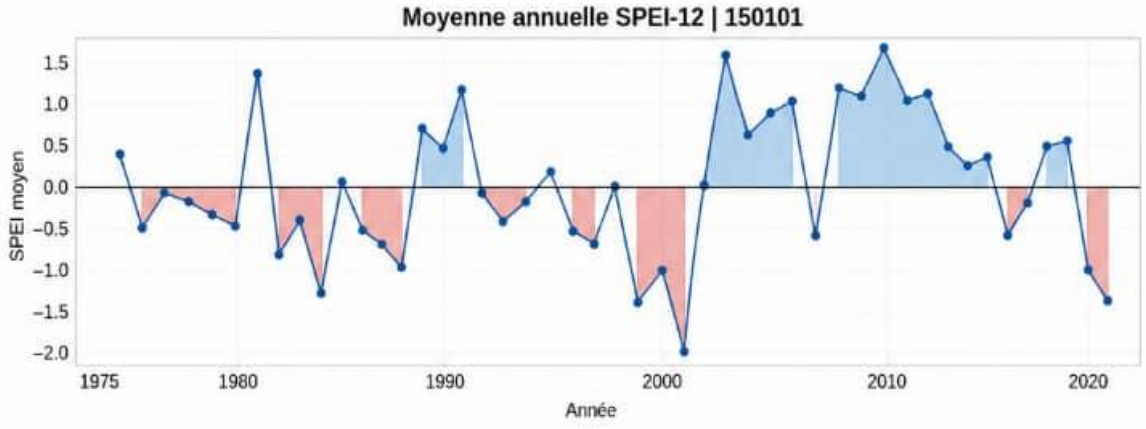

Moyenne annuelle SPEI-12 | 150101
SPEI moyen
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
−2.0
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

Figure 5.6 : Évolution temporelle des indices SPEI-1. SPEI-3. SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150101.

L'analyse des graphiques de la station 150101 permet d'évaluer la réponse du bilan hydrique aux fluctuations thermiques et pluviométriques combinées :

-L'indice SPEI-1 (Échelle mensuelle) : Il met en évidence une très forte instabilité avec une alternance rapide et hachée des mois secs (rouge) et humides (bleu). Les pics négatifs fréquents traduisent la sensibilité immédiate de la station aux anomalies de températures à très court terme.

-L'indice SPEI-3 (Échelle saisonnière) : À cette échelle. Les séquences déficitaires commencent à s'allonger. On observe des blocs de mois secs plus compacts. Ce qui témoigne de l'installation de sécheresses saisonnières (agricoles) nettes. Notamment durant les décennies 1980 et 1990.

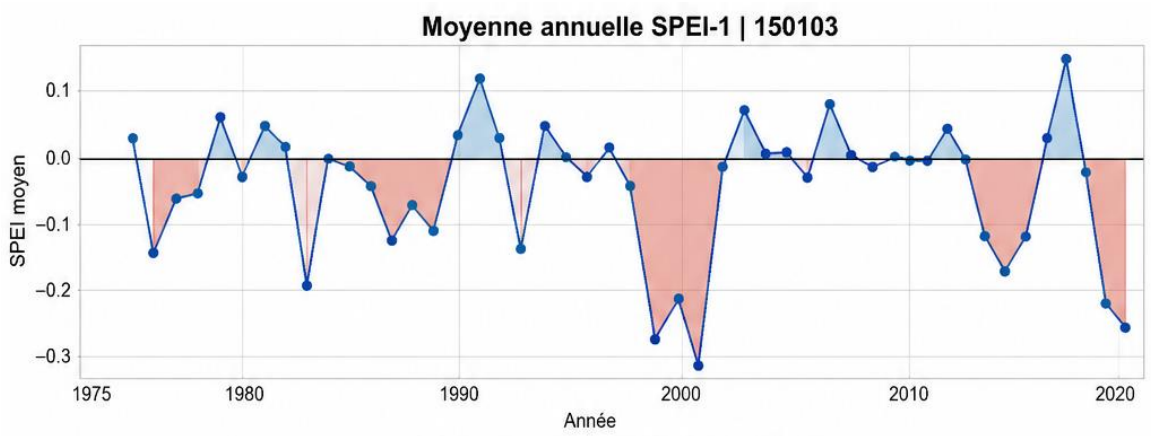
-L'indice SPEI-6 (Échelle semestrielle) : Ce signal lisse les variations mensuelles pour faire ressortir les grandes tendances de l'année agricole. On y décèle des cycles secs profonds où la courbe plonge de manière remarquable sous la barre des -1.5 (sécheresse sévère).

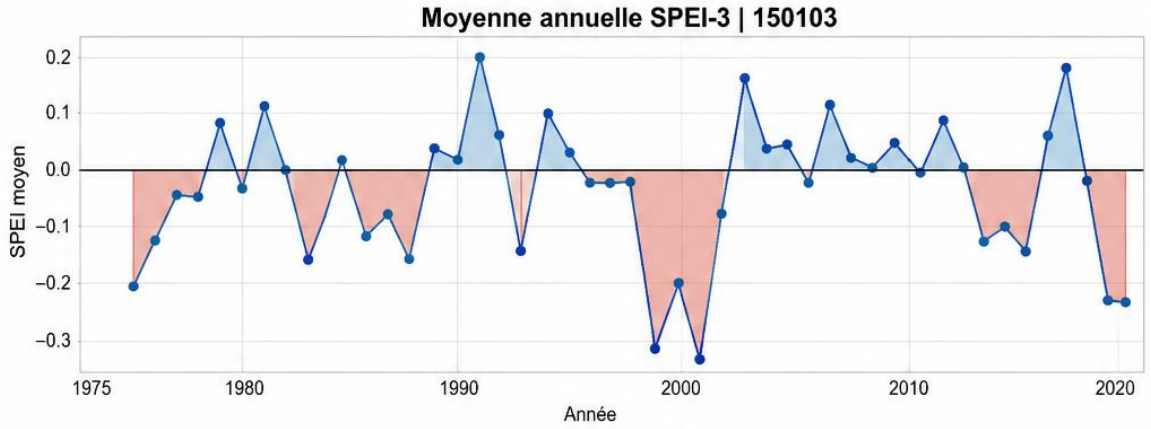
Illustrant comment la demande évaporative aggrave le manque d'eau durant les saisons clés.

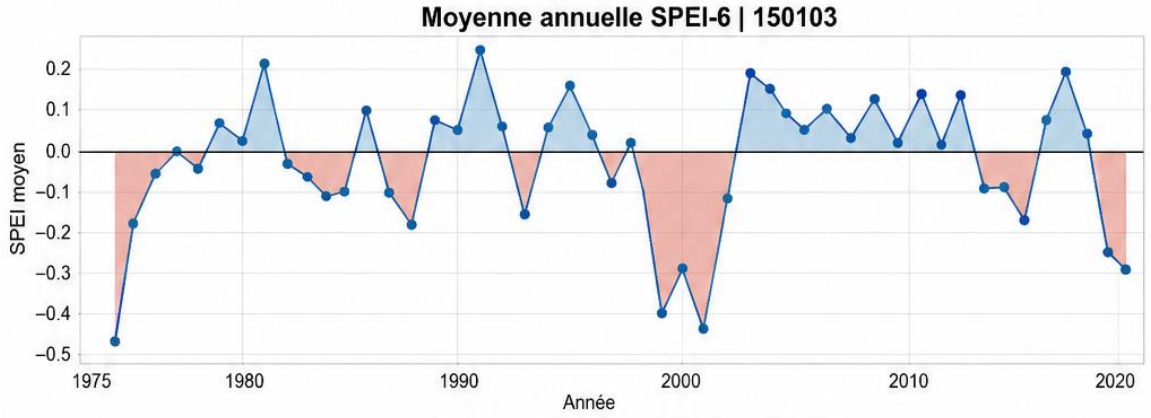
-L'indice SPEI-12 (Échelle annuelle) : C'est l'indicateur de la tendance à long terme. Le graphique montre clairement la succession des grands cycles pluriannuels de la station : la domination de la sécheresse durant la période 1980-1990, l'anomalie déficitaire majeure et brutale de 2002, suivies d'une phase de récupération globalement excédentaire.

Enfin, la période récente (Post-2019) est marquée par une rechute nette de la courbe, confirmant le retour du stress hydrique durable.

• Résultats et interprétation détaillée de l'indice SPEI (station 150103) :


Moyenne annuelle SPEI-1 | 150103
SPEI moyen
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-3 | 150103
SPEI moyen
0.2
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-6 | 150103
SPEI moyen
0.2
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

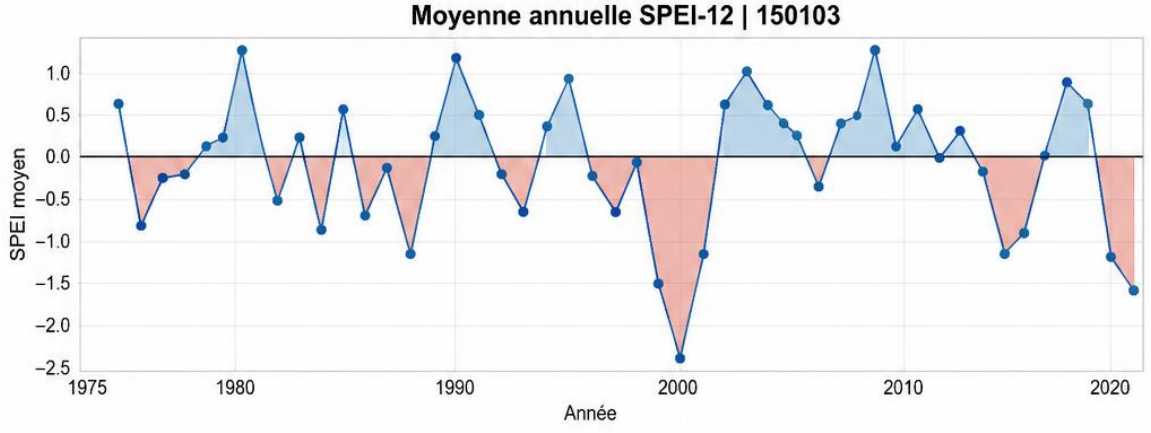

Moyenne annuelle SPEI-12 | 150103
SPEI moyen
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
−2.0
−2.5
1975
1980
1990
2000
2010
2020
Année

Figure 5.7 : Évolution temporelle des indices SPEI-1. SPEI-3. SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150103.

L'analyse des graphiques de la station 150103 met en évidence une vulnérabilité thermique majeure. Accentuant sévèrement l'intensité des crises hydriques par rapport à l'indice SPI :

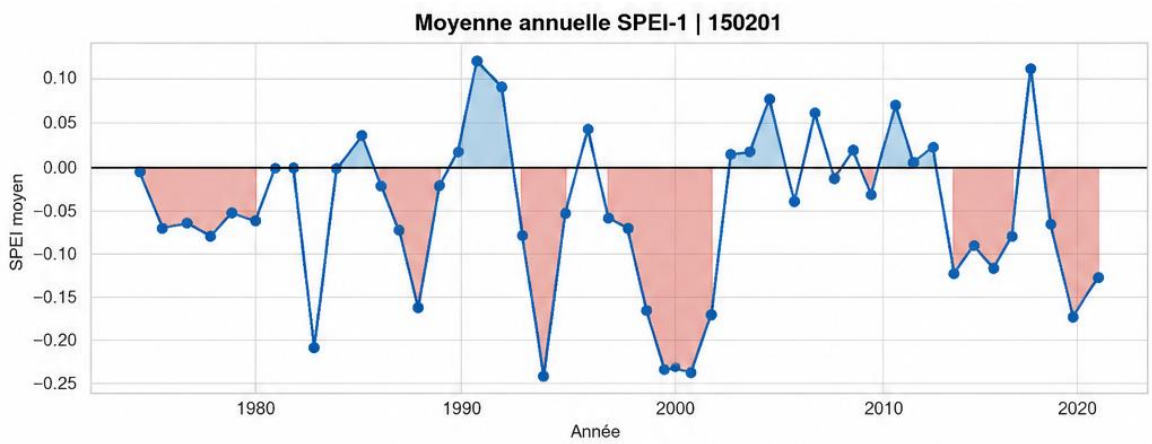
-L’indice SPEI-1 (Échelle mensuelle) : Il présente une alternance mensuelle très agressive. Les pics négatifs (en rouge) sont fréquents et intenses. Traduisant la rapidité avec laquelle les vagues de chaleur estivales accentuent le stress hydrique à très court terme.

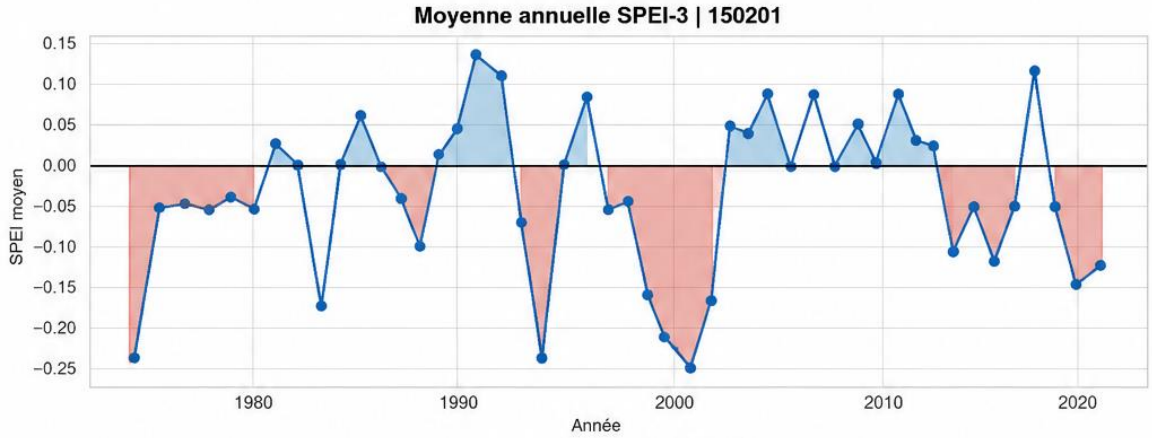
-L’indice SPEI-3 (Échelle saisonnière) : Illustre la persistance des sécheresses saisonnières. Les cycles déficitaires s'élargissent. Confirmant l'impact du cumul des températures élevées sur l'évapotranspiration durant les saisons clés de croissance.

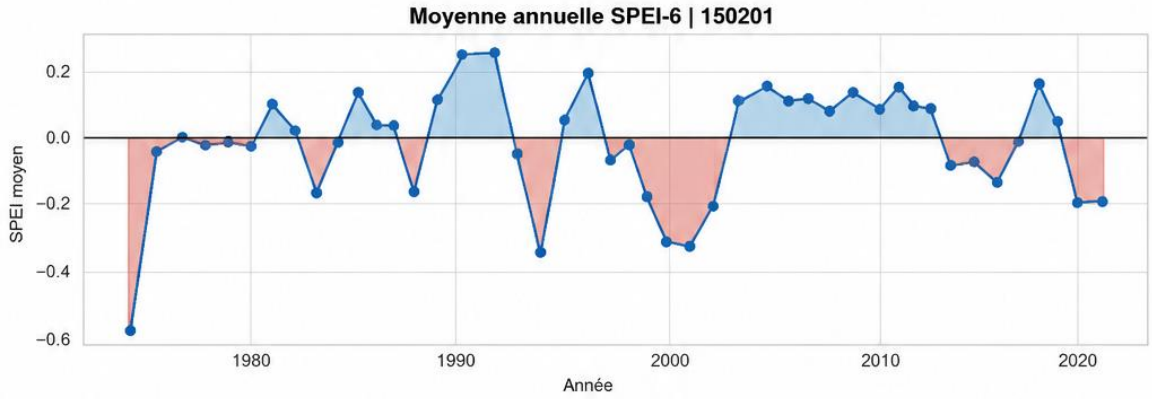
-L’indice SPEI-6 (Échelle semestrielle) : C'est l'échelle clé de cette station. Le graphique - montre un effondrement historique du signal autour de l'année 2002. Où la courbe plonge de manière spectaculaire pour atteindre le minimum absolu de -5.09 enregistré dans le tableau de synthèse. Cela démontre que le déficit pluviométrique combiné à une forte demande évaporative. a engendré une sécheresse agricole d'une violence extrême.

-L’indice SPEI-12 (Échelle annuelle) : Confirme la tendance pluriannuelle à long terme. On y décèle la longue phase sèche de la décennie 1980-1990. Suivie de la crise majeure de 1999-2002. Malgré une phase de récupération humide entre 2003 et 2018. La période récente (Post-2019) montre une nouvelle chute abrupte de l'indice. Confirmant le retour du déficit hydrique durable.

• Résultats et interprétation de la station 150201 (SPEI) :


Moyenne annuelle SPEI-1 | 150201
SPEI moyen
0.10
0.05
0.00
−0.05
−0.10
−0.15
−0.20
−0.25
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-3 | 150201
SPEI moyen
0.15
0.10
0.05
0.00
−0.05
−0.10
−0.15
−0.20
−0.25
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SPEI-6 | 150201
SPEI moyen
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
1980
1990
2000
2010
2020
Année

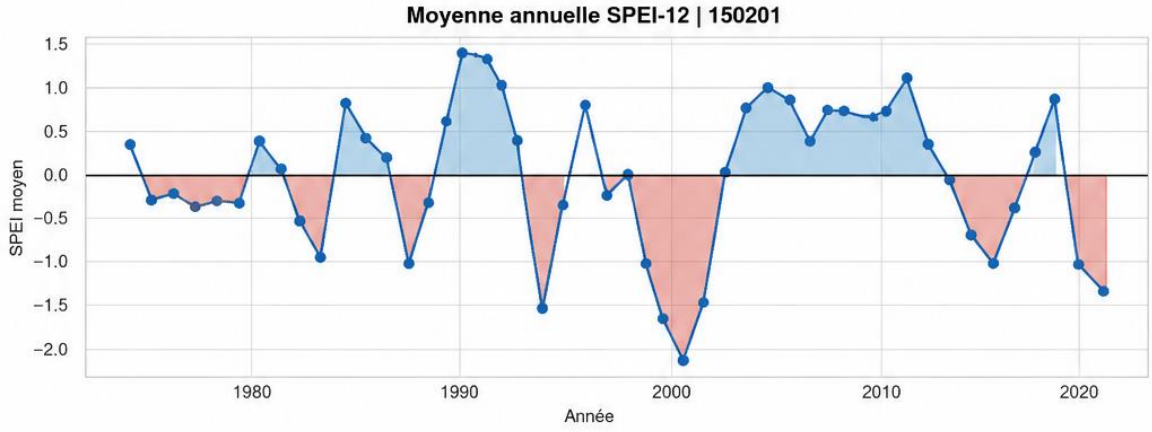

Moyenne annuelle SPEI-12 | 150201
SPEI moyen
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
−2.0
1980
1990
2000
2010
2020
Année

Figure 5.8 : Évolution temporelle des indices SPEI-1. SPEI-3. SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150201.

L'analyse des graphiques de la station 150201 met en évidence une transition climatique nette. Tout en révélant une aggravation des périodes sèches historiques sous l'effet thermique :

-L'indice SPEI-1 (Échelle mensuelle) : Présente une forte variabilité avec des oscillations très hachées. C'est à cette échelle que se manifeste le maximum absolu enregistré de +3.72 confirmants la survenance d'épisodes mensuels exceptionnellement humides et frais au cours de la décennie 2000.

-L'indice SPEI-3 (Échelle saisonnière) : Permet d'observer le contraste entre les deux moitiés de la chronique. Les séquences de sécheresse saisonnière (en rouge) dominent largement avant l'an 2000 tandis que les saisons humides deviennent prépondérantes après 2003.

-L'indice SPEI-6 (Échelle semestrielle) : Illustre le comportement à l'échelle agricole. La courbe plonge de manière très prononcée durant la période 1980-1990. L'impact de l'évapotranspiration y est flagrant car les indices descendent à des niveaux critiques. S'alignant avec les fortes anomalies sèches semestrielles du bassin.

-L'indice SPEI-12 (Échelle annuelle) : Synthétise la mémoire climatique globale de la station. On y distingue clairement la longue phase déficitaire pluriannuelle des premières décennies. Suivie d'une rupture nette à partir de 2003 marquant l'entrée dans un grand cycle excédentaire durable. Enfin, une tendance récente à la baisse (Post-2019) annonce le retour progressif du stress hydrique.

• Résultats et interprétation de la station 150204 (SPEI) :

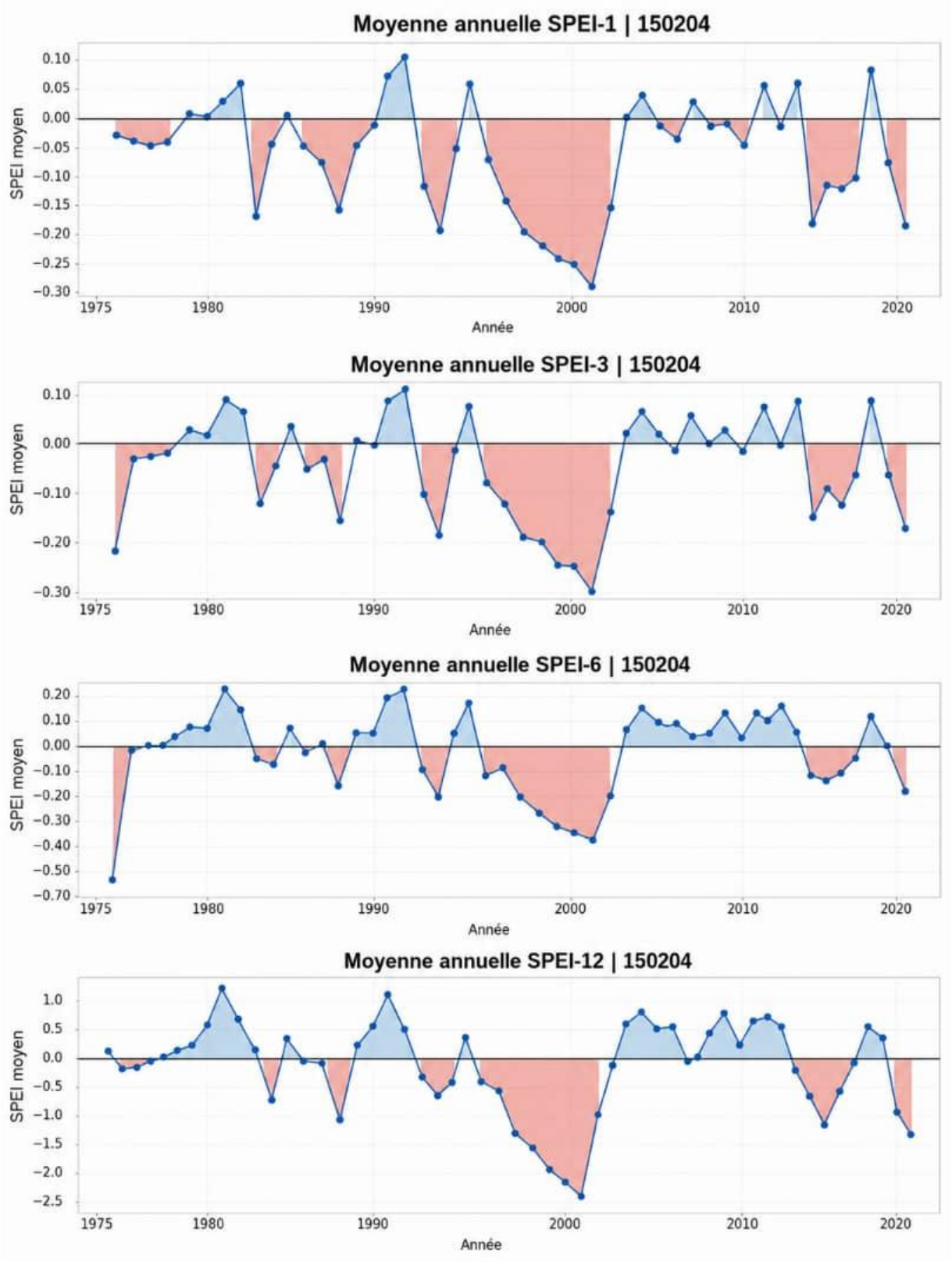


Figure 5.9 : Évolution temporelle des indices SPEI-1. SPEI-3. SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150204.

L'analyse des graphiques de la station 150204 confirme que cette zone est la plus vulnérable du bassin aux sécheresses prolongées, intensifiées par l'effet thermique :

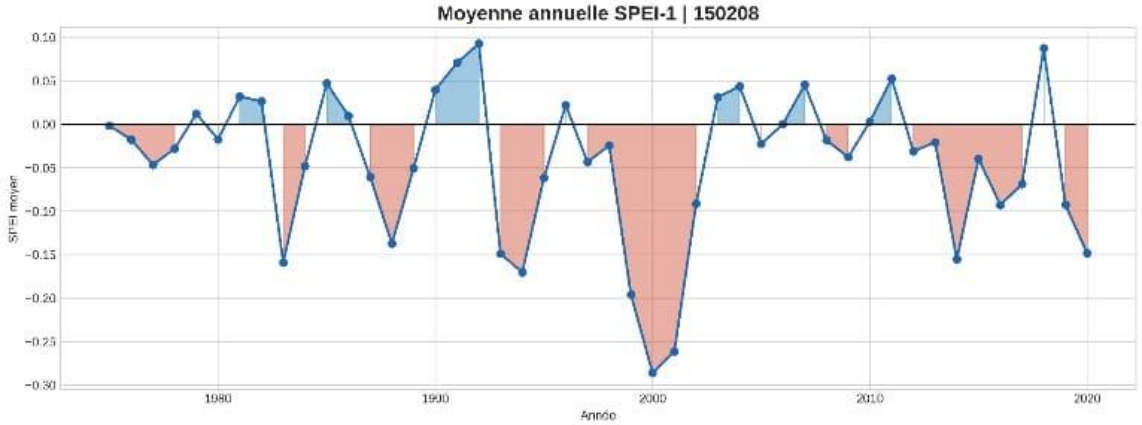
-L’indice SPEI-1 (Échelle mensuelle) : Il montre une variabilité mensuelle très hachée. On y distingue des pointes négatives extrêmes fréquentes. Indiquant que la combinaison du manque de pluie et des températures élevées provoque des chocs hydriques mensuels brutaux.

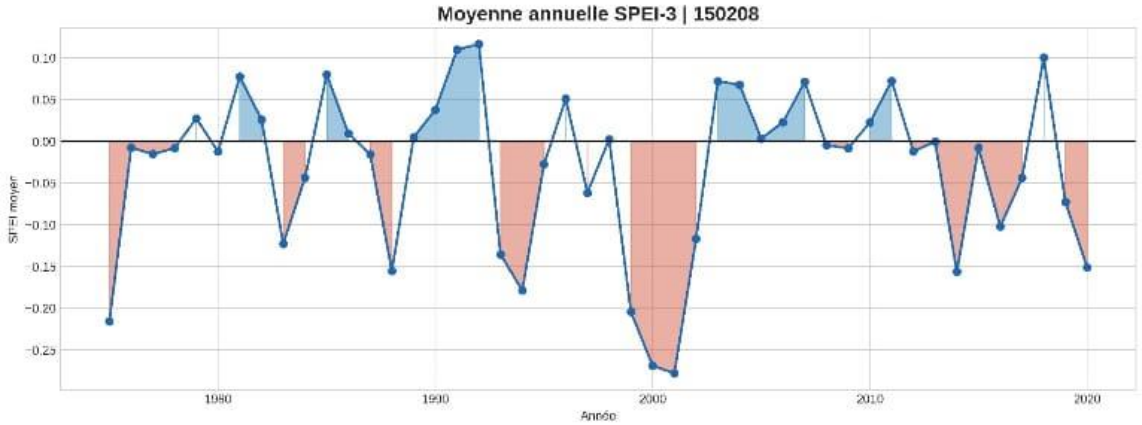
-L’indice SPEI-3 (Échelle saisonnière) : Reflète des blocs déficitaires (en rouge) de plus en plus compacts. Les saisons sèches s'étalent de manière continue. Impactant sévèrement les cycles végétatifs de la région.

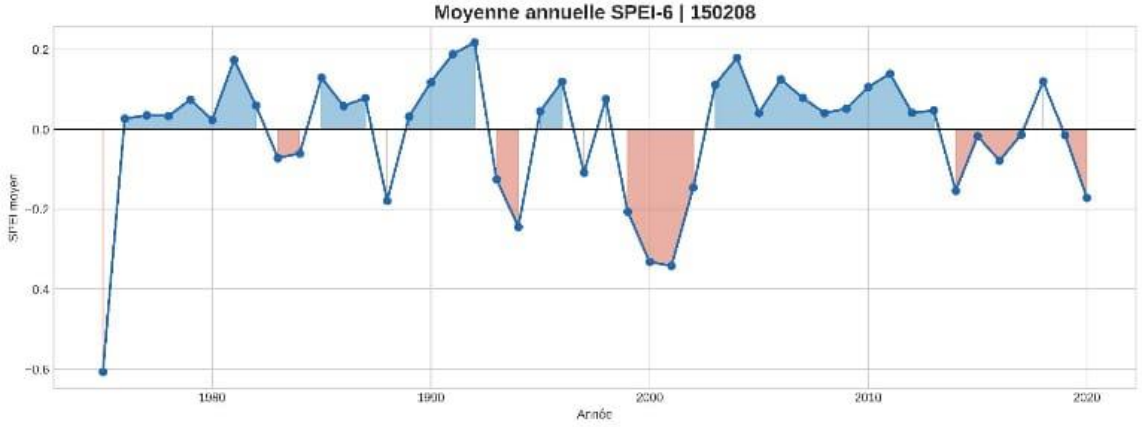
-L’indice SPEI-6 (Échelle semestrielle) : Illustre la sévérité de la sécheresse agricole. Le signal plonge de manière spectaculaire et reste déficitaire sur des périodes semestrielles successives. Notamment durant la crise majeure des années 1980 et de 2002.

-L’indice SPEI-12 (Échelle annuelle) : C'est l'indicateur le plus parlant pour cette station. Il met en évidence un creux thermique et hydrique exceptionnel entre 1999 et 2002. Où la courbe reste bloquée dans le rouge critique. Cela justifie statistiquement les 26 mois de sécheresse extrême enregistrés dans le tableau de synthèse. Prouvant que cette station subit des sécheresses pluriannuelles profondes. Enfin. La rechute récente (Post-2019) y est extrêmement prononcée.

• Résultats et interprétation de la station 150208 (SPEI) :


Moyenne annuelle SPEI-1 | 150208
SPEI moyen
Année


Moyenne annuelle SPEI-3 | 150208
SPEI moyen
Année


Moyenne annuelle SPEI-6 | 150208
SPEI moyen
Année

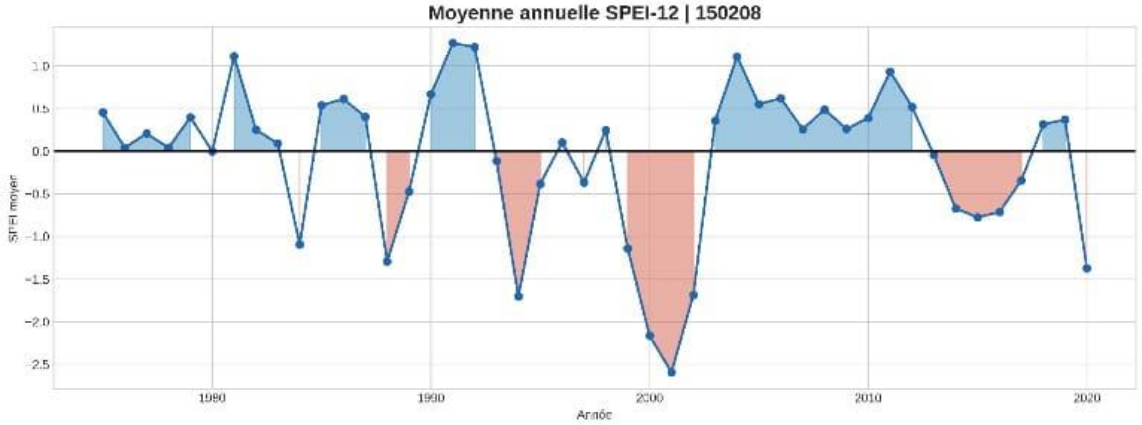

Moyenne annuelle SPEI-12 | 150208
SPEI moyen
Année

Figure 5.10 : Évolution temporelle des indices SPEI-1. SPEI-3. SPEI-6 et SPEI-12 au niveau de la station 150208.

L'analyse des graphiques de la station 150208 montre un comportement globalement Plus résilient face au déficit hydrique malgré la persistance de certains cycles secs :

-L'indice SPEI-1 (Échelle mensuelle) : Il affiche une forte variabilité mensuelle. On y observe des pics humides très intenses ce qui montre que cette zone conserve une dynamique d'alimentation hydrique mensuelle importante à très court terme.

-L'indice SPEI-3 (Échelle saisonnière) : Reflète le comportement des saisons. Bien que les séquences sèches (en rouge) soient bien visibles durant la décennie 1980 et l'an 2002, les blocs humides (en bleu) restent largement dominants et plus denses sur le reste de la chronique.

-L'indice SPEI-6 (Échelle semestrielle) : Permet de lisser le signal agricole. Les cycles de sécheresse semestrielle y apparaissent moins profonds et moins durables par rapport aux autres stations du bassin, Confirmant une meilleure disponibilité en eau durant les saisons clés.

-L'indice SPEI-12 (Échelle annuelle) : Illustre la tendance à long terme. Après la phase sèche des années 1980-1990 et le pic de 2002.

La station bascule de manière spectaculaire dans un grand cycle excédentaire continu et très marqué entre 2003 et 2018. Ce comportement justifie sa statistique favorable dans le tableau de synthèse (94 mois secs au total). Enfin.

Une rechute modérée vers des valeurs négatives est enregistrée sur la période récente (Post-2019).

5.3. Analyse. Caractérisation et synthèse des résultats du reconnaissance Drought Index (SDI)

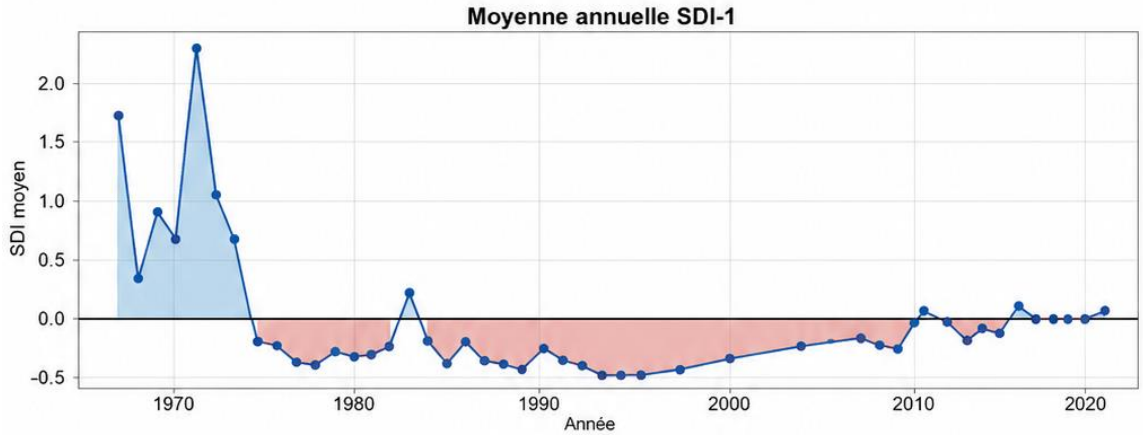
Indice	Min	Max	Mean	Dry Months (<-1)	Severe Dry (<-1.5)	Extreme Dry (<-2)	Wet Months (>1)
SDI-1	-0.48503	15.25184	-1.5E-17	0	0	0	28
SDI-3	-0.59451	9.887722	8.92E-17	0	0	0	32
SDI-6	-0.69671	7.629167	0	0	0	0	38
SDI-12	-0.78399	5.536884	1,21E-16	0	0	0	43

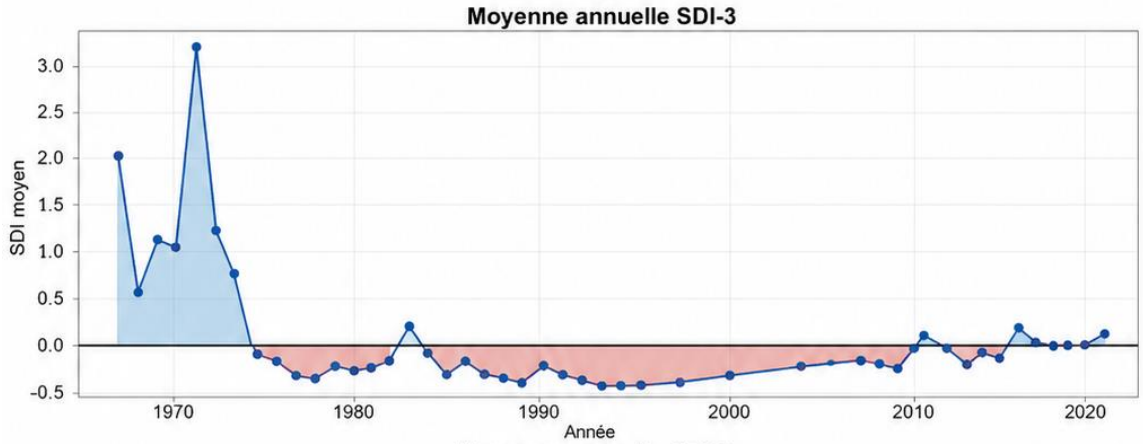
5.3. Synthèse des caractéristiques de la sécheresse hydrologique (SDI) au niveau de station 150204.

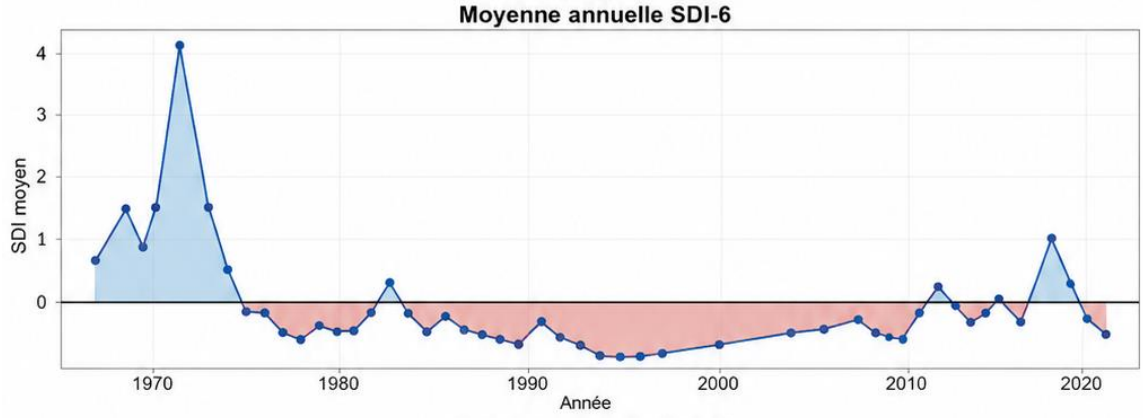
Analyse et commentaire du tableau de synthèse (SDI) :

L'analyse de l'indice SDI à différentes échelles temporelles (1. 3. 6 et 12 mois) montrent que les valeurs moyennes sont proches de zéro. Traduisant un équilibre global entre les périodes sèches et humides. Les valeurs minimales ne dépassent pas le seuil de sécheresse modérée (-1). Ce qui indique l'absence de sécheresse hydrologique significative durant la période d'étude. En revanche. Le nombre de mois humides est relativement élevé. Notamment à long terme (SDI-12), ce qui reflète une dominance des conditions humides dans le bassin versant. Ainsi. le régime hydrologique étudié apparaît globalement stable, avec une tendance vers des conditions humides pouvant être associées à des épisodes pluvieux important

- **Résultats et interprétation de la station 150204 (SDI) :**


Moyenne annuelle SDI-1
SDI moyen
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SDI-3
SDI moyen
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Année


Moyenne annuelle SDI-6
SDI moyen
4
3
2
1
0
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Année

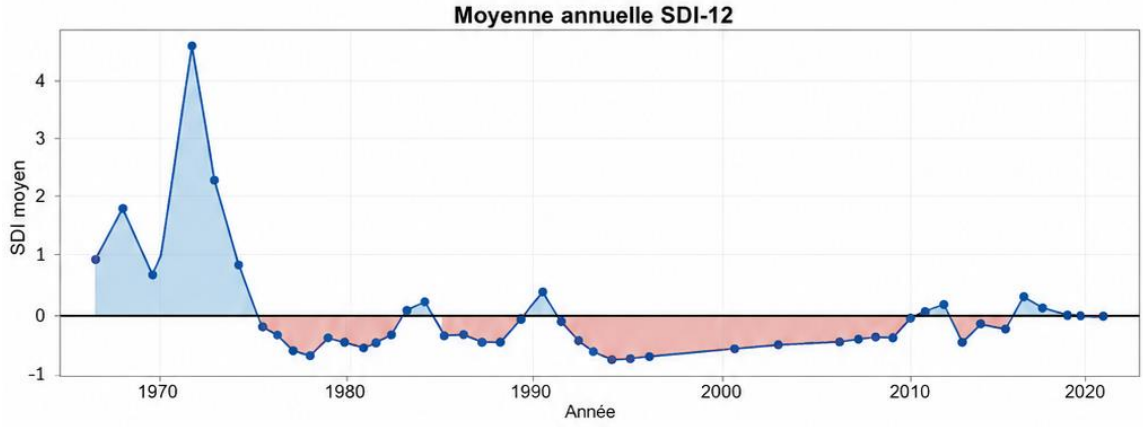

Moyenne annuelle SDI-12
SDI moyen
4
3
2
1
0
-1
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Année

Figure 5.11. Variations de la moyenne annuelle de l'indice SDI (1.3.6et 12 moins) dans la station hydrométrique 150204

L'analyse des graphiques de l'indice de sécheresse hydrologique (SDI), basé sur les données de débit de la station hydrométrique 150204, montre une dynamique temporelle bien spécifique :

-L'indice SDI-1 : Présente une très forte fluctuation à court terme. Il met en évidence un pic humide exceptionnel au tout début de la série (vers les années 1970) avec un débit maximal très élevé. Suivi d'une longue phase de déficit modéré et homogène.

-L'indice SDI-3 : À l'échelle saisonnière, le lissage des débits commence à se dessiner. La période initiale reste fortement excédentaire, tandis que la période s'étalant de 1980 à la fin des années 2000 s'installe durablement sous la ligne de zéro, sans pour autant franchir des seuils de sécheresse extrême.

-L'indice SDI-6 : Permet d'observer la dynamique semestrielle des écoulements. Ce graphique montre clairement que la réserve hydrique saisonnière de la station hydrométrique 150204 est restée déficitaire de manière continue pendant près de trois décennies, avant une stabilisation proche de la normale après 2010.

-L'indice SDI-12 : À l'échelle annuelle. L'impact sur le régime hydrologique global est flagrant. On distingue nettement deux grands cycles : une phase de hautes eaux majeure (pics bleus prononcés avant 1980) due à des débits historiquement élevés. Suivie d'une très longue période de tarissement ou de sécheresse hydrologique continue. Qui ne commence à se résorber que vers la décennie 2010.

5.4. Interprétation Générale des Résultats

L'approche multi-indices adoptée dans ce chapitre permet de croiser les dimensions météorologiques, thermiques/agricoles et hydrologiques afin de comprendre globalement la dynamique de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam.

5.4.1. Validation Statistique et Normalisation des Indices

Toutes les valeurs moyennes calculées pour les différents indices tendent rigoureusement vers zéro (comprises globalement entre moins zéro virgule zéro soixante-dix-huit et plus zéro virgule zéro soixante-dix-neuf). Sur le plan statistique, cela démontre la bonne normalisation et la robustesse des indices sur l'ensemble de la période d'étude, traduisant un équilibre général à long terme malgré la récurrence des crises climatiques.

5.4.2. Dynamique de la Sécheresse Climatique et Agricole

• **Sensibilité des échelles temporelles :** Les échelles à court terme (un mois) mettent en évidence une instabilité extrême et des fluctuations mensuelles brutales. Les signaux commencent à se structurer à l'échelle saisonnière (trois mois), tandis que les échelles semestrielles (six mois) et annuelles (douze mois) révèlent la mémoire climatique globale du bassin et l'installation des sécheresses pluriannuelles destructrices.

• **L'effet amplificateur des anomalies thermiques :** L'intégration de l'évapotranspiration montre une aggravation nette de l'intensité des sécheresses par rapport au simple indice de précipitation. À titre d'exemple, à la station quinze-zéro-un-zéro-trois. La valeur minimale extrême plonge de moins quatre virgule soixante-quinze à l'échelle semestrielle des précipitations à moins cinq virgule zéro neuf lorsque l'on intègre la température. Cela prouve scientifiquement que les hautes températures et la demande évaporative exacerbent le déficit en eau du sol, pénalisant lourdement les saisons agricoles clés.

• **Vulnérabilité spatiale :**

La station quinze-zéro-deux-zéro-quatre se distingue comme étant la plus vulnérable du bassin aux crises hydriques prolongées, totalisant vingt-deux mois de sécheresse annuelle extrême pour les précipitations et vingt-six mois après intégration de la température. À l'inverse. La station quinze-zéro-deux-zéro-huit affiche une plus grande résilience globale, caractérisée par des cycles humides dominants et un nombre minimal de mois secs (quatre-vingt-quatorze mois au total).

5.4.3. Réponse du Système Hydrologique et Phénomène de Décalage (Time-lag)

L'analyse de l'indice de sécheresse des débits au niveau de la station hydrométrique quinze-zéro-deux-zéro-quatre révèle une dynamique temporelle bien spécifique :

Bien que les valeurs minimales des débits ne franchissent pas les seuils de sécheresse extrême (restant au-dessus du seuil de sécheresse modérée), le régime hydrologique est marqué par une transition historique majeure.

• **Le décalage temporel (Time-lag) :**

Après une phase initiale de hautes eaux majeures (débits historiquement très élevés avant l'année mille neuf cent quatre-vingt). La station s'installe dans une longue période de tarissement continu qui dure près de trois décennies des années mille neuf cent quatre-vingt jusqu'à la fin des années deux mille. Ce déficit hydrologique prolongé et lissé montre l'inertie du système

superficiel : le stress climatique atmosphérique met du temps à se propager. Mais s'installe durablement dans le réseau hydrologique ne commençant à se résorber qu'après deux mille dix.

5.5. Synthèse Chronologique des Grands Cycles Climatiques

Le croisement des résultats permet de découper l'histoire hydro-climatique du bassin de la Soummam en quatre grandes phases :

Caractérisation Hydro-Climatique Globale	Période
Cycle déficitaire persistant : Succession d'années sèches visible sur l'ensemble des stations à l'échelle annuelle, marquant le début du tarissement hydrologique	Décennie 1980 - 1990
Pic de sécheresse historique : Anomalie négative extrêmement prononcée et généralisée. Atteignant des seuils critiques (particulièrement en 2002).	La crise majeure (1999 - 2002)
Grand cycle excédentaire : Conditions humides dominantes ponctuées par des pics remarquables en 2004. 2005 et 2012 permettant une recharge des réserves.	Phase de récupération (2003 - 2018)
Retour du stress hydrique : Chute synchrone et brutale de toutes les courbes sous la ligne de la normale. Confirmant l'installation d'un nouveau cycle de sécheresse durable.	Période récente (Post-2019)

Tableau 5.4. Caractérisation hydro-climatique globale du bassin versant de la Soummam

Conclusion :

L’analyse approfondie des résultats du Chapitre Cinq met en évidence une transition climatique nette au sein du bassin de la Soummam. Le phénomène de sécheresse commence par un déficit pluviométrique (météorologique). S’intensifie sous l'effet de la hausse des températures (agricole). Pour finir par impacter durablement les écoulements de surface (hydrologique). Cette situation post-2019 impose de nouveaux défis pour la gestion stratégique des ressources en eau de la région.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, consacré à l'analyse de la sécheresse dans le bassin versant de la Soummam, une approche intégrée combinant climatologie, hydrologie et outils géomatiques a été adoptée afin de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle de ce phénomène complexe. L'exploitation d'une série de données s'étalant de 1975 à 2021 a permis de mettre en évidence les principales tendances évolutives du régime hydro climatique de la région, dans un contexte marqué par la variabilité climatique et les changements globaux. L'application conjointe des indices SPI, SPEI et SDI a constitué un cadre méthodologique robuste, permettant d'appréhender la sécheresse selon différentes dimensions complémentaires. Les résultats obtenus révèlent une alternance marquée entre périodes humides et sèches, mais surtout une tendance significative à l'intensification et à la récurrence accrue des épisodes de sécheresse au cours des dernières décennies. Cette évolution traduit clairement l'influence des changements climatiques, caractérisés notamment par une diminution des précipitations et une élévation des Températures. L'apport des outils SIG et des techniques de cartographie thématique a été déterminant dans la valorisation des résultats. En effet, la spatialisation des indices de sécheresse a permis d'identifier avec précision les zones les plus exposées et vulnérables au sein du bassin versant. Cette dimension spatiale constitue un élément clé pour l'aide à la décision, en offrant aux gestionnaires une vision synthétique et opérationnelle de la répartition du risque de sécheresse.

Par ailleurs, l'analyse comparative des indices a montré la pertinence particulière du SPEI dans le contexte actuel, en raison de sa capacité à intégrer l'effet de l'évapotranspiration, fortement influencée par l'augmentation des températures. Cela met en évidence que la sécheresse ne peut plus être interprétée uniquement comme un déficit pluviométrique, mais comme le résultat d'interactions complexes entre plusieurs paramètres climatiques. Sur le plan hydrologique, la corrélation observée entre les déficits pluviométriques et la diminution des débits confirme l'impact direct de la sécheresse climatique sur les ressources en eau, avec un temps de réponse différé du système hydrologique traduisant son inertie.

Dans ce contexte, les implications de ces résultats dépassent le cadre purement académique et interpellent directement les politiques de gestion des ressources hydriques. Ainsi, plusieurs recommandations stratégiques peuvent être formulées :

- ✓ Le renforcement et la modernisation des réseaux de mesure hydro-climatique, afin d'améliorer la qualité et la continuité des données.
- ✓ La mise en place de systèmes d'alerte précoce basés sur des indicateurs fiables tels que le SPI, le SPEI et le SDI.
- ✓ L'intégration systématique des outils SIG et des approches de modélisation dans les processus de planification et de gestion territoriale.
- ✓ L'adoption de politiques de gestion intégrée et durable des ressources en eau, tenant compte des contraintes climatiques actuelles et futures. Le développement de stratégies d'adaptation, notamment dans le secteur agricole, fortement vulnérable aux épisodes de Le renforcement de sécheresse.
- ✓ La sensibilisation et de la gouvernance locale en matière de gestion de l'eau.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives de recherche importantes. Il serait pertinent d'intégrer des modèles climatiques prospectifs afin d'anticiper l'évolution future de la sécheresse dans la région. De même, une approche pluridisciplinaire plus élargie, intégrant les dimensions socio-économiques et environnementales, permettrait d'évaluer de manière plus globale les impacts de la sécheresse et d'optimiser les stratégies d'adaptation.

En definitive, cette etude constitue une base scientifique solide pour la comprehension du phenomene de secheresse dans le bassin de la Soummam, tout en mettant en evidence la nécessité d'une gestion proactive et intégrée face aux défis imposés par le changement climatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Angelidis, P., Maris, F., et Vlassiois, N., 2011. Computation of Drought index SPI with Alternative distribution function, international journal of climatology, pp 28-30.
2. Anne. F., et Van Loon, 2015. Hydrological drought explained. WIREs Water, 2, pp: 359–392. Doi: 10.1002/wat2.1085.
3. Balek j, Jones G.P., et Skofteland, E., 1989. Notes de cours de formation pour technicien en hydrologie, une contribution au programme hydrologique international. Ed : Unesco, Paris. 34 p.
4. Beaudin, I., 2006. Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation de la condition de sécheresse en milieu méditerranéen, programme en sciences géomatiques faculté de foresterie et géomatique université Laval. 233 p.
5. Beddal, D., 2015. analyse statistique des apports liquides en climat semi-aride cas du bassin versant de la mactaa, Mémoire de magister, Département d'Hydraulique, université de Hassiba Benbouali, Chlef, 160 p.
6. Bellout, M., 2015. Etude de la répartition fréquentielle et annuelle des débits des cours d'eau de l'Algérie du nord, Mémoire de magister, Département de génie civil et hydraulique, université de Kasdi Merbah, Ouargla, 143 p.
7. Benslimane, D., Hamomed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., ET Mederbal, K., 2008.
8. Nouara Algérie", un réseau algérien de bonnes volontés écologistes. La revue électronique en sciences de l'environnement, Vol.8, N° 3. P37-45.
9. Bied charton, M., 2007. Sécheresse, désertification et développement en Afrique, Cours de master 2, université de Versailles Saint Quentin, Yvelines, 53 p.
10. Daniel, C., Edwards, L., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Atmospheric science paper No. 634, 172 p.
11. Djellouli, Y., 1990. Flores et climats en Algérie septentrionale. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes. Thèse Doct. Sciences, USTHB., Alger, 210 p.
12. Hebal, A., et Remini, B., 2012. Étude de la variabilité spatio-temporelle des pluies dans le Nord algérien. Revue Eau et Climat au Maghreb, N° 1. 150 p.
13. Meddi, H. et Meddi, M., 2003. Étude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaines de Markov. Centre universitaire de Khemis Miliana. Courrier du savoir N°09, pp.39-48.

14. Michel, B., 1996. La planification des stratégies contre les effets de la sécheresse. Groupe d'Agrométéorologie, FAO. 9 p.
15. Morell, M., 1999. Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. Ed: H G A, Bucarest, 202 p.
16. Musy, A. ET Higy, C., 2003. Hydrologie une science de la nature. Ed : polytechniques et universitaires de romandes, Lausanne, 309 p.
17. OMM, 2008. Guide des pratiques hydrologiques, hydrologie de la mesure à l'information hydrologique. OMM, N°168, 322 p.
18. OSS, 2013. Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb, collection synthèse. Tunis, N 04, 88 p.
19. Programme de gestion intégrée des sécheresses, 2016. Manuel des indicateurs et des indices de sécheresse. OMM, No. 1173. 52 p.
20. Ramane, A., 2006. Gestion des eaux pluviales en milieu urbaine pour un développement durable, université d'Abomey-Calavi, République du Bénin-DEA. 65 p.
21. Remenieras, G., 1986. L'hydrologie de l'ingénieur. Ed : Eyrolles, Paris, 456p.
22. Safar Zitoun, M., 2006. Evaluation des dispositifs d'alerte précoce à la sécheresse existants à l'échelle nationale, Cas de l'Algérie, OSS-N° 82, 88 p.
23. Soukatchoff, M., 2003. Hydrologie et hydrogéologie. école des mines de nancy France. 89 p.
24. Touaibia, B., 2004. Manuel pratique d'hydrologie. Ed. Madani Frères, Guerouou, Blida, 166 p.
25. WMO (World Meteorological Organization). 2006. Drought Monitoring and Early Warning: Concepts, Progress and Future Challenges, WMO-No. 1006, ISBN 92-63-11006-9, Geneva, Switzerland.
26. WMO, 2012. Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations, Organisation météorologique mondiale (OMM), pp15-25.
27. ABH-ASH (2002-2003). Présentation générale du bassin de la Soummam, contexte géologique et étude hydrologique (mission I). Potentiabilités et mobilisations en eau (mission II). Rapports de missions, Agence du Bassin Hydrographique Algérois-Soummam-Hodna.

28. ANRH (1974). Étude hydrogéologique de la vallée d'Oued Sahel-Soummam et hydrologie des nappes alluviales d'Oued Soummam. Rapport interne, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger.
29. Charifi, S. (2003). Application d'un Système Information Géographique (SIG) à l'étude des caractéristiques physiques, géologiques, et bioclimatiques du bassin versant de la Soummam.
30. Bétier, G., Royer, L., Termier, H. et Laffitte, R. (1951). Carte géologique détaillée de Sidi Aïch, feuille N°46 (1/50 000e). Service Géologique d'Algérie.
31. Bentoumi, O., ; Hammou, W. (2021). L'apport de la télédétection et des SIG dans l'étude d'évolution du couvert végétal du sous bassin d'Oued Soummam, Mémoire de Master Académique, Université de M'sila.
32. Hammani, N., Mesbah, Mamp ; Semar, A. (2015). Etude des ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam, INRAA - FSTGAT-USTHB - ENSA, recherche agronomique n° 27.
33. Kessasra, F. (2015). Modélisation hydrogéologique des écoulements des eaux souterraines et de surface de la nappe des alluvions de la vallée de la Soummam (Nord-Est Algérie) Impacts sur l'environnement et les écosystèmes.
34. Meddi, M. ; Boutaghane, H. (2013). Étude des ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam (Algérie). Revue des Sciences d'Eau, 26(4).
35. AGEP, Géosystem Consult (1999). Alimentation en eau potable et industrielle des agglomérations situées dans le couloir Akbou-Béjaïa à partir du barrage de Tichi Haf. Rapport d'étude, Alger.

Sitographie

1. Belala, F., Hirche, A., 2013. Changements climatiques : tendance et variabilité pluviométrique dans quelques stations steppiques algériennes. Site: http://www.usthb.dz/fbiol/IMG/pdf/paper_10.pdf

2. Hayes, M.J., 2011. Comparison of Major Drought Indices: Introduction, National Drought Mitigation Center. Site: http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro.aspx.

3. Libbey, 2013. Site: http://www.jle.com/edocs/00/04/49/CA/article.phtml?fichier

4. Madaan, S., 2016. Site: https://www.eartheclipse.com/natural-disaster/causes-and-effects-of drought.html

5. Mohammed ET scholz, 2016. Site : https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1546-9

6. OMPE, 2019. Site : https://www.ompe.org/secheresse-mondiale/

7. Sbouai, 2019. Site : https://www.partagedeseaux.info/L-eau-ressource-vitale-en-danger-au-Maghreb

8. Singh Joorel, 2010. Site: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/74559/10/10_

9. Tigkas, 2014. Site : https://www.readcube.com/articles/10.1007%2Fs12145-014-0178-y?author_access_token=qQ_A7UAj2Uwy5

الجمـــهورية الجزائـــرية الديمقراطية الشعبيـــة.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف /2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : **Mr. Sadoune Abdelaziz** Président de Jury

Certifie que :

L'étudiant(e) : **Benyoucef Khaoula**

Spécialité : **Aménagement Hydro-Agricole**

Intitulé : **Évaluation Spatio-Temporelle de la Sécheresse Hydrologique à Partir des Séries Hydrologiques Dans le Bassin Versant de la Soummam.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

L'encadreur

Président de Jury

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف /2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Président de Jury

Je soussigné : **Mr. Sadoune Abdelaziz**

Certifie que :

L'étudiant(e) : **Bendjama Ahmed**

Spécialité : **Aménagement Hydro-Agricole**

Intitulé : **Évaluation Spatio-Temporelle de la Sécheresse Hydrologique à Partir des Séries Hydrologiques Dans le Bassin Versant de la Soummam.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

l'encadreur

Président de Jury

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف /2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : **Mr. Sadoune Abdelaziz** Président de Jury

Certifie que :

L'étudiant(e) : **Alilemouyes Imane**

Spécialité : **Aménagement Hydro-Agricole**

Intitulé : **Évaluation Spatio-Temporelle de la Sécheresse Hydrologique à Partir des Séries Hydrologiques Dans le Bassin Versant de la Soummam.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

L'encadreur

Président de Jury