

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

KASDI MERBAH-OUARGLA UNIVERSITY  
UNIVERSITE KASDI MERBAH- OUARGLA



جامعة قاصدي مرباح-ورقلة  
Année 2023

Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de  
la Terre et de l'Univers

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

*Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle*

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

*Régionalisation et cartographie des précipitations  
et des indices de sécheresse dans les bassins versants  
du Nord-Est algérien  
(Constantinois-Seybouse-Mellègue).*

Par : DERRADJI Tahani

Devant le Jury

Président :	ZEDDOURI Aziez	Pr.	Univ. Kasdi Merbah. Ouargla.
Encadreur :	BELKSIER Mohamed Salah	MCA	Univ. Kasdi Merbah. Ouargla.
Co-Encadreur :	BOUZNAD Imad-Eddine	MCA	Univ. Ziane Achour. Djelfa.
Examineurs :	NEZLI Imad Eddine	Pr.	Univ. Kasdi Merbah. Ouargla.
	BOUSELSAL Boualem	Pr.	Univ. Kasdi Merbah. Ouargla.
	BOUACHA Mohamed Islem	MCA	Univ. Ibn Khaldoun. Tiaret.

Année universitaire : 2022/2023

## Résumé

En raison de la variabilité climatique qui a augmenté au cours des dernières années, l'Algérie a connu une sécheresse intense caractérisée par les variations de pluviométrie ce qui provoquent une baisse des réserves en eau due à la diminution des précipitations et de l'augmentation de l'évaporation résultant de l'élévation de la température, avec des effets néfastes sur l'agriculture. La zone d'étude est située au Nord-est algérien et comprend une variété de conditions climatiques, allant de l'humide au nord, à semi-aride au sud.

L'objectif principal de la présente étude est d'analyser la régionalisation et les variations spatio-temporelles de la sécheresse sur le bassin versant du Constantinois Seybouse-Mellegue pendant les années 1989 à 2020, en se basant sur le calcul des indices de sécheresses météorologique : Standardized Precipitation Index (SPI), Reconnaissance Drought Index (RDI) et des indices de sécheresses agricole : Vegetation Condition Index (VCI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) et Vegetation Health Index (VHI). Le VHI dépend du stress thermique et de l'état de la végétation, qui a été calculé en intégrant l'indice de condition de la végétation et l'indice de condition de la température. Ici, nous avons appliqué l'algorithme de clustering K-means sur le VHI pour trouver différents clusters avec des caractéristiques de sécheresse distinctes. L'analyse spatio-temporelle de VHI révèle que les zones nord (C1), centrale (C2) et sud (C3) de la région d'étude étaient sujettes à des sécheresses fréquentes d'intensité nulle à modérée. Les variations spatio-temporelles des caractéristiques de sécheresse ont indiqué que de vastes portions des zones C1 et C2 ne montrent aucun signe de sécheresse, qui ont été classées comme « aucune sécheresse ». La zone C3 a subi une longue période de sécheresse avec une sévérité légère à modérée. Les résultats ont révélé qu'environ 59,91% de la zone C3 était touchée par la sécheresse en 2012, et donc, cette année a été considérée comme une année de sécheresse. Il est important de noter que la zone C3, comprenant la partie semi-aride du bassin, est vulnérable aux sécheresses fréquentes, prolongées et modérées. Les résultats de la régionalisation de la sécheresse sont validés par la méthode de la matrice de confusion. L'exactitude globale de 79% démontre l'efficacité de la méthode de la régionalisation de la sécheresse. Les résultats obtenus pourraient être importants pour les alertes de sécheresse, la gestion des ressources en eau, et la programmation de l'irrigation dans les zones vulnérables au risque de sécheresse comme celle étudiée.

**Mots clés :** Sécheresse - SPI - VHI - Précipitation - MODIS - Bassin versant.

## **Abstract**

As a result of the climate variations that have increased in recent years, Algeria has experienced an intense drought characterized by rainfall variations that cause a decrease in water reserves due to the decrease in precipitation and the increase in evaporation due to the rise in temperature with adverse effects on agriculture. The study area is located in northeastern Algeria and includes a variety of climatic conditions, ranging from humid in the north to semi-arid in the south.

The core objective of the present study is to analyze the regionalization and spatio-temporal variations of drought over the watershed Constantinois-Seybouse-Mellegue (Northeast Algeria) during the years 1989 to 2020, based on the calculation of meteorological drought indices: Standardized Precipitation Index (SPI), Reconnaissance Drought Index (RDI) and of agricultural drought indices: Vegetation Condition Index (VCI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Health Index (VHI). VHI depends on heat stress and vegetation condition, which was computed by integrating the Vegetation Condition Index and Temperature Condition Index. Here, we applied K-means clustering algorithm on VHI to find out different clusters with distinct drought characteristics. The spatio-temporal analysis of VHI reveals that the northern (C1), central (C2), and southern (C3) zones of the study area were prone to frequent droughts of no drought to moderate intensity. The spatio-temporal variations of drought characteristics indicated that extensive portions of C1 and C2 areas show no sign of drought, which were determined the “no drought” class. C3 zone had suffered long drought period with mild to moderate severity. The results revealed that about 59.91% of the C3 zone was under drought in 2012, and therefore, it was considered as a drought year. It should be noted that the C3 zone, comprising the semi-arid part of the basin, is vulnerable to frequent, prolonged, and moderate droughts. The results of the regionalization of drought are validated by confusion matrix method. The achieved 79% overall accuracy demonstrates the effectiveness of the method of the regionalization of drought. The obtained results could be important for drought warnings, water resource management, and irrigation scheduling in areas vulnerable to drought risk such as the studied one.

**Keywords:** Drought - SPI - VHI - Precipitation - MODIS – Watershed.

## ملخص

بسبب التقلبات المناخية التي زادت في السنوات الأخيرة ، عانت الجزائر من جفاف شديد تميز بتغيرات في هطول الأمطار مما تسبب في انخفاض احتياطيات المياه بسبب انخفاض هطول الأمطار وزيادة التبخر الناتج عن ارتفاع درجة الحرارة مع الآثار السلبية على الزراعة. تقع منطقة الدراسة في شمال شرق الجزائر وتضم مجموعة متنوعة من الظروف المناخية ، متغيرة من الرطوبة في الشمال إلى شبه القاحلة في الجنوب.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحليل الإقليمية والتغيرات المكانية والزمانية للجفاف في مستجمعات المياه في شمال شرق الجزائر خلال السنوات 1989 إلى 2020 ، بناءً على حساب مؤشرات الجفاف الجوية : Reconnaissance Drought (SPI) Standardized Precipitation Index ، (VCI) Vegetation Condition Index ، (RDI) Index ومؤشرات الجفاف الزراعي : (NDVI) Normalized Difference Vegetation Index ، (VHI) Vegetation Health Index. يعتمد VHI على التوتر الحراري وظروف الغطاء النباتي ، والذي تم حسابه من خلال دمج مؤشر حالة الغطاء النباتي ومؤشر حالة درجة الحرارة. قمنا هنا بتطبيق خوارزمية التجميع K-mean على VHI للعثور على مجموعات مختلفة ذات خصائص جفاف مميزة. يكشف التحليل المكاني والزمني لـ VHI أن المناطق الشمالية (C1) والوسطى (C2) والجنوبية (C3) من منطقة الدراسة كانت عرضة لجفاف متكرر. أشارت الاختلافات المكانية والزمانية في خصائص الجفاف إلى أن أجزاء كبيرة من مناطق C1 و C2 لا تظهر أي علامات للجفاف ، والتي تم تحديدها على أنها فئة "لا جفاف". عانت منطقة C3 فترة طويلة من الجفاف مع شدة خفيفة إلى معتدلة. وكشفت النتائج أن حوالي 59.91٪ من منطقة C3 كانت تعاني من الجفاف في عام 2012 ، وبالتالي فهي تعتبر سنة جفاف. وتجدر الإشارة إلى أن منطقة C3 ، التي تضم الجزء شبه القاحل من الحوض ، معرضة للجفاف المتكرر والمطول والمعتدل. يتم التحقق من صحة نتائج أقلمة الجفاف من خلال طريقة مصفوفة الارتباك. تُظهر الدقة الإجمالية البالغة 79٪ فعالية طريقة أقلمة الجفاف. يمكن أن تكون النتائج التي تم الحصول عليها مهمة للتحذيرات من الجفاف ، وإدارة موارد المياه ، وجدولة الري في المناطق المعرضة لمخاطر الجفاف مثل التي تمت دراستها.

الكلمات المفتاحية: الجفاف - VHI - SPI - الهطول - MODIS - الحوض الهيدروغرافي

## Dédicace

*À ma grande mère pour sa tendresse, son amour, et son encouragement durant toute ma vie pour que je puisse réussir.*

*À ma très chère mère « tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte.*

*En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée »*

*À ma très chère tante N, signe d'amour, de tendresse, de respect, et qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*À ma très chère Zora, mes chers cousins, cousines et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*À toutes mes amies qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*À tous ceux que j'aime*

*Merci !*

## Remerciement

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à dieu qui m'a facilité le travail en mettant sur mon chemin des gens qui m'ont énormément aidé et soutenu.*

*Un spécial remerciement à mon Directeur de thèse **monsieur BELKSIER Mohamed Salah**, pour m'avoir encadré, suivi et encouragé tout au long de ce travail sans autant oublier ses précieuses orientations et ses conseils.*

*Je voudrais également adresser mes vifs remerciements au co-directeur de la thèse le **docteur BOUZNAD Imad-Eddine** pour l'intérêt incessant qu'il a porté au suivi de ce travail, J'ai beaucoup apprécié ses méthodes de travail, la liberté qu'il m'a laissée dans l'organisation de ces recherches et ses nombreux encouragements réguliers, ses remarques, toujours pertinentes, ont été très bénéfiques à l'avancement de cette thèse.*

*Je remercie spécialement le Professeur **DJIDEL Mohamed** pour son aide précieuse, sa disponibilité durant toutes ces années de recherche et surtout dans le domaine du Système d'information géographique et de la télédétection, je lui exprime ici toute ma gratitude.*

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier également **Pr. ZEDDOURI Aziez** Professeur à l'université de Ouargla, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de la soutenance.*

*Je tiens à remercier les membres du jury, **Pr. NEZLI Imad Eddine** et **Pr. BOUSELSAL Boualem** de l'Université de Ouargla et **Dr. BOUACHA Mohamed Islem** de l'université de Tiaret qui ont accepté d'examiner ce travail de recherche, je leur exprime ici ma gratitude.*

*Je remercie aussi monsieur **Bengusmia Djamal** de **BNEDEK** pour son aide en matière de données de télédétection.*

*Mes remerciements vont aussi à monsieur **Zehsa Rabah**, Maître de Conférences "A" à l'Université de Guelma. Je remercie également monsieur **Guastaldi Enrico**, Directeur de **GOAexplorer Impresa Sociale S.r.l. Italie**.*

*Je remercie toute personne, qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de cette thèse.*

**DERRADJI Tahani**

## Table des matières

RESUME.....	I
ABSTRACT .....	II
ملخص .....	III
DEDICACE .....	IV
REMERCIEMENT.....	V
TABLE DES MATIERES .....	VI
LISTE DES FIGURES .....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D’ETUDE.....</b>	<b>4</b>
1. PRESENTATION DE LA REGION D’ETUDE.....	4
2. APERÇU SOCIO-ECONOMIQUE .....	6
3. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DU CSM.....	8
3.1. <i>Relief</i> .....	8
3.2. <i>Pentes</i> .....	9
4. OCCUPATION DU SOL.....	10
5. PEDOLOGIE .....	12
6. APERÇU GEOLOGIQUE.....	13
6.1. <i>Le domaine interne</i> .....	14
6.2. <i>Le domaine des flyschs</i> .....	14
6.3. <i>Le domaine externe</i> .....	14
<b>CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DE LA REGION.....</b>	<b>16</b>
1. INTRODUCTION.....	16
2. PARAMETRES DE FORME .....	16
2.1. <i>Surface et périmètre</i> .....	16
2.2. <i>Indice de compacité de Gravelius</i> .....	17
2.3. <i>Rectangle équivalent</i> .....	19
3. PARAMETRES DE RELIEF.....	21
3.1. <i>La courbe hypsométrique</i> .....	21
3.2. <i>Altitudes Caractéristiques</i> .....	24
3.2.1. <i>Altitude maximale et minimale</i> .....	24

3.2.2. Altitude moyenne .....	24
3.2.3. Altitude médiane .....	24
3.2.4. L'altitude H95% .....	24
3.2.5. L'altitude H5% .....	24
3.3. <i>Les indices des pentes</i> .....	26
3.4. <i>Dénivelée spécifique</i> .....	26
4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	28
4.1. <i>Extraction du réseau hydrographique et son hiérarchisation sur ArcGis</i> .....	28
4.2. <i>Caractéristiques du réseau hydrographique</i> .....	30
4.3. <i>Description du réseau hydrographique</i> .....	30
5. CONCLUSION.....	37
<b>CHAPITRE III: CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET LEURS IMPACTS.....</b>	<b>38</b>
1. INTRODUCTION.....	38
2. LES FACTEURS CLIMATIQUES .....	39
2.1. <i>Précipitation moyenne annuelles</i> .....	39
2.2. <i>Précipitations moyennes mensuelles</i> .....	40
2.3. <i>Températures moyennes annuelles</i> .....	44
2.4. <i>Températures moyennes mensuelles</i> .....	46
3. TYPE DE CLIMAT.....	49
3.1. <i>Diagramme pluvio-thermique (Relation précipitation – température)</i> .....	49
3.2. <i>Indice d'aridité de Emmanuel de MARTONNE</i> .....	51
3.2.1. <i>Indice d'aridité annuel</i> .....	51
3.2.2. <i>Indice d'aridité mensuel</i> .....	52
3.3. <i>Cartographie de l'indice d'aridité</i> .....	53
3.4. <i>Climagramme de L. EMBERGER</i> : .....	54
4. BILAN HYDRIQUE :.....	56
4.1. <i>Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite</i> :.....	56
4.2. <i>Interprétation du bilan hydrique</i> :.....	57
5. CONCLUSION.....	60
<b>CHAPITRE IV : ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS .....</b>	<b>61</b>
1. INTRODUCTION.....	61
2. ANALYSE DES PRECIPITATIONS.....	62
2.1. <i>Précipitations moyennes annuelles</i> .....	62
2.2. <i>Coefficient pluviométrique (H)</i> .....	66
3. REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS.....	69



4. CARTOGRAPHIE DES PLUVIOMETRIES MOYENNES ANNUELLES DECENNALES .....	70
5. CARTOGRAPHIE DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE SUR LA PERIODE 1971-2021 .....	73
6. CONCLUSION.....	74
<b>CHAPITRE V : ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DES INDICES DE SECHERESSE .....</b>	<b>75</b>
1. INTRODUCTION.....	75
2. ANALYSE DE LA SECHERESSE BASEE SUR DES DONNEES METEOROLOGIQUES .....	76
2.1. <i>Indice Standardisé des Précipitations (SPI)</i> .....	76
2.2. <i>Analyse de la sécheresse entre la période 1989-2019 en utilisant l'indice SPI-12</i> .....	78
2.3. <i>Indice de sécheresse de reconnaissance (RDI)</i> .....	83
2.4. <i>Analyse de la sécheresse entre la période 1989-2019 en utilisant l'indice RDI-12</i> .....	84
2.5. <i>la variation temporelle de l'indice standardisé des précipitations (SPI) et de l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI)</i> .....	88
3. ANALYSE DE LA LA SECHERESSE BASEE SUR DES DONNEES DE TELEDETECTION .....	89
3.1. <i>Caractéristiques techniques du capteur MODIS –TERRA</i> .....	89
3.2. <i>Développement des indicateurs satellitaires</i> .....	90
3.2.1. <i>Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)</i> .....	90
3.2.2. <i>La température de surface des terres (LST)</i> .....	90
3.2.3. <i>Condition de végétation VCI</i> .....	91
3.2.4. <i>Condition de température TCI</i> .....	91
3.2.5. <i>Conditions de végétation et de température VHI</i> .....	92
3.3. <i>Analyses spatiales</i> .....	93
4. LA CORRELATION ENTRE L'INDICE SPI ET VHI .....	101
5. CONCLUSION.....	102
<b>CHAPITRE VI: SURVEILLANCE SPATIO-TEMPORELLE ET DETECTION DES ZONES VULNERABLES A LA SECHERESSE .....</b>	<b>103</b>
1. INTRODUCTION.....	103
2. DONNEES ET METHODOLOGIE ADOPTEE .....	103
2.1. <i>Données et source</i> .....	103
2.2. <i>Méthodologie</i> .....	104
2.2.1. <i>Clustering</i> .....	105
2.2.2. <i>Dynamic Time Warping (DTW)</i> .....	106
2.2.3. <i>Classification par k-means clustering</i> .....	106
2.2.4. <i>Analyse spatiale et cartographie</i> .....	106
2.2.5. <i>Matrice de confusion</i> .....	107
3. LES RESULTATS DE CLUSTERING .....	108
3.1. <i>Validation</i> .....	111

3.2. Variation spatio-temporelle du VHI .....	112
3.2.1. Analyse des cartes VHI de la zone 1 .....	112
3.2.2. Analyse des cartes VHI de la zone 2 .....	113
3.2.3. Analyse des cartes VHI de la zone 3 .....	115
3.3. Classification de la sévérité de la sécheresse .....	116
4. CONCLUSION.....	117
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>120</b>

## Liste des figures

<i>FIGURE 1 : LIMITES ET LOCALISATION DE LA REGION HYDROGRAPHIQUE CONSTANTINOIS SEYBOUSE MELLEGUE (DECOUPAGE SELON ANRH) .....</i>	<i>5</i>
<i>FIGURE 2 : DECOUPAGE ADMINISTRATIF DE LA REGION HYDROGRAPHIQUE CONSTANTINOIS SEYBOUSE MELLEGUE .....</i>	<i>6</i>
<i>FIGURE 3 : CARTE ALTIMETRIQUE .....</i>	<i>8</i>
<i>FIGURE 4 : CARTE DES PENTES .....</i>	<i>10</i>
<i>FIGURE 5 : CARTE D'OCCUPATION DU SOL (ESA WORLDCOVER 2020) .....</i>	<i>11</i>
<i>FIGURE 6 : CARTES DES SOLS (EXTRAIT DE LA CARTE DES SOLS D'ALGERIE. CONSTANTINE. FEUILLE N.J. 32-S.O. ECHELLE 1/500.000 ÉDITÉE EN 1948 PAR DURAND, M.J-H., BARBUT, M.M).....</i>	<i>13</i>
<i>FIGURE 7 : CARTE GEOLOGIQUE (EXTRAIT DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE -CONSTANTINE NORD- ECHELLE 1/500.000 ÉDITÉE EN 1951-1952 PAR M. G. BÉTIER) .....</i>	<i>15</i>
<i>FIGURE 8 : CARTE DES SOUS BASSINS VERSANTS .....</i>	<i>17</i>
<i>FIGURE 9 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN COTIERS CONSTANTINOIS .....</i>	<i>21</i>
<i>FIGURE 10 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN SEYBOUSE .....</i>	<i>22</i>
<i>FIGURE 11 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN KEBIR-RHUMEL .....</i>	<i>22</i>
<i>FIGURE 12 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN MEDJERDA .....</i>	<i>23</i>
<i>FIGURE 13 : COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN HAUTS PLATEAUX .....</i>	<i>23</i>
<i>FIGURE 14 : ORGANIGRAMME POUR LA DELIMITATION ET L'EXTRACTION DES BASSINS VERSANTS .....</i>	<i>29</i>
<i>FIGURE 15 : CARTE DES RESEAU HYDROGRAPGIQUE.....</i>	<i>31</i>
<i>FIGURE 16 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE ANNUELLES DE 1981 A 2021 .....</i>	<i>39</i>
<i>FIGURE 17 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS .....</i>	<i>40</i>
<i>FIGURE 18 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA SEYBOUSE .....</i>	<i>41</i>
<i>FIGURE 19 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DU KEBIR-RHUMEL .....</i>	<i>42</i>
<i>FIGURE 20 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA MEDJERDA .....</i>	<i>43</i>
<i>FIGURE 21 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES HAUTS PLATEAUX .....</i>	<i>44</i>
<i>FIGURE 22 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE ANNUELLES DE 1981 A 2021 .....</i>	<i>45</i>

FIGURE 23 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS .....	46
FIGURE 24 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA SEYBOUSE .....	47
FIGURE 25 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DU KEBIR-RHUMEL .....	47
FIGURE 26 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA MEDJERDA .....	48
FIGURE 27 : HISTOGRAMME DES TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES HAUTS PLATEAUX .....	49
FIGURE 28 : DIAGRAMMES PLUVIOTHERMIQUES AUX DIFFERENTES BASSIN VERSANT .....	50
FIGURE 29 : TYPE DE CLIMAT SELON L'INDICE D'ARIDITE DE MARTONNE.....	54
FIGURE 30 : CLIMAGRAMME D'EMBERGER.....	55
FIGURE 31 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DU BILAN DE THORNTHWAITE .....	58
FIGURE 32 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE RFU, EXCEDENT ET DEFICIT (MM).....	59
FIGURE 33 : CARTE DE LA REPARTITION DES STATIONS DANS LA ZONE D'ETUDE .....	61
FIGURE 34 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS-EST.....	62
FIGURE 35 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS-CENTRE .....	63
FIGURE 36 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS-OUEST .....	63
FIGURE 37 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA SEYBOUSE .....	64
FIGURE 38 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DU KEBIR-RHUMEL .....	64
FIGURE 39 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DE LA MEDJERDA .....	65
FIGURE 40 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE 1981 A 2021 POUR LE BASSIN DES HAUTS PLATEAUX .....	65
FIGURE 41: HISTOGRAMME DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE POUR LE BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS .	66
FIGURE 42 : HISTOGRAMME DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE POUR LE BASSIN DE LA SEYBOUSE .....	67
FIGURE 43 : HISTOGRAMME DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE POUR LE BASSIN DU KEBIR-RHUMEL.....	67

FIGURE 44 : HISTOGRAMME DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE POUR LE BASSIN DE LA MEDJERDA .....	68
FIGURE 45 : HISTOGRAMME DU COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE POUR LE BASSIN DES HAUTS PLATEAUX.....	68
FIGURE 46 : CARTE DE LA REPARTITION SAISONNIERE DES PLUIES .....	69
FIGURE 47 : HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE AU COURS AU COURS DE LA DECENNIE 1971-1981.....	70
FIGURE 48 : HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE AU COURS AU COURS DE LA DECENNIE 1981-1991.....	71
FIGURE 49 : HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE AU COURS AU COURS DE LA DECENNIE 1991-2001.....	72
FIGURE 50 : HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE AU COURS AU COURS DE LA DECENNIE 2001-2011.....	72
FIGURE 51 : HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE AU COURS AU COURS DE LA DECENNIE 2011-2021.....	73
FIGURE 52 : HAUTEUR PLUVIOMETRIQUE MOYENNE ANNUELLE DE 1971 A 2021 .....	74
FIGURE 53 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU SPI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1989-1990 AU 1998-1999 .....	80
FIGURE 54 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU SPI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1999-2002 AU 2008-2009 .....	81
FIGURE 55 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU SPI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1999-2002 AU 2008-2009 .....	82
FIGURE 56 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU RDI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1989-1990 AU 1998-1999 .....	85
FIGURE 57 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU RDI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1999-2000 AU 2008-2009 .....	86
FIGURE 58 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DU RDI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 2009-2010 AU 2018-2019 .....	87
FIGURE 59 : VARIATION TEMPORELLE DU SPI ET RDI ANNUELLE SUR LA REGION HYDROGRAPHIQUE (CSM) ENTRE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 1989-1990 AU 2018-2019 .....	88
FIGURE 60 : ORGANIGRAMME REPRESENTANT LA METHODOLOGIE ADOPTEE.....	93
FIGURE 61 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2001-2003).....	95
FIGURE 62 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2004-2006).....	96
FIGURE 63 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2007-2009).....	97
FIGURE 64 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2010-2012).....	98

---

<i>FIGURE 65 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2013-2015)</i> .....	99
<i>FIGURE 66 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2016-2018)</i> .....	100
<i>FIGURE 67 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE NDVI, LST, TCI, VCI, SPI ET VHI (2019)</i> .....	101
<i>FIGURE 68 : CORRELATION NDVI, LST, TCI, VCI, VHI ET SPI</i> .....	102
<i>FIGURE 69 : ORGANIGRAMME REPRESENTANT LA METHODOLOGIE ADOPTEE</i> .....	104
<i>FIGURE 70 : LES DIFFERENTES ETAPES DU PROCESSUS DE CLUSTERING</i> .....	105
<i>FIGURE 71 : CARTE DES CLASSES D'ARIDITE IDM DANS LA ZONE D'ETUDE</i> .....	108
<i>FIGURE 72 : DISTRIBUTION SPATIALE DES TROIS ZONES DE CLUSTER</i> .....	109
<i>FIGURE 73 : VARIATION DES VALEURS MOYENNES DE VHI DANS LA ZONE 1</i> .....	110
<i>FIGURE 74 : VARIATION DES VALEURS MOYENNES DE VHI DANS LA ZONE 2</i> .....	110
<i>FIGURE 75 : VARIATION DES VALEURS MOYENNES DE VHI DANS LA ZONE 3</i> .....	111
<i>FIGURE 76 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DU VHI DANS LA ZONE 1 (2000-2020)</i> .....	113
<i>FIGURE 77 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DU VHI DANS LA ZONE 2 (2000-2020)</i> .....	114
<i>FIGURE 78 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DU VHI DANS LA ZONE 3 (2000-2020)</i> .....	115
<i>FIGURE 79 : VARIABILITE TEMPORELLE DU VHI DANS LA ZONE 3 (2000-2020)</i> .....	117

## Liste des tableaux

TABEAU 1: LES REGIONS HYDROGRAPHIQUES ET LEURS BASSINS VERSANTS .....	4
TABEAU 2: REPARTITION DE LA POPULATION PAR WILAYAS DANS LE BASSIN DE LA CONSTANTINOIS SEYBOUSE MELLEGUE .....	7
TABEAU 3: REPARTITION DU RELIEF PAR CLASSE DES PENTES .....	9
TABEAU 4: LES SURFACES DE CHAQUE CLASSE D'OCCUPATION DES SOLS .....	10
TABEAU 5: LES SURFACES DE CHAQUE TYPE DE SOL .....	12
TABEAU 6: SUPERFICIE DES BASSINS VERSANTS DE LA REGION HYDROGRAPHIQUE CSM .....	17
TABEAU 7: INDICES DE COMPACITE PAR SOUS BASSIN VERSANT .....	18
TABEAU 8: LONGUEUR EQUIVALENTE ET LARGEUR EQUIVALENTE PAR SOUS BASSIN VERSANT .....	20
TABEAU 9: LES ALTITUDES CARACTERISTIQUES PAR SOUS BASSIN VERSANT .....	24
TABEAU 10: CLASSIFICATION DU RELIEF SELON IG PAR L'ORSTOM .....	26
TABEAU 11: CLASSIFICATION DU RELIEF SELON DS .....	27
TABEAU 12: VALEURS DE IG ET DS PAR SOUS BASSIN VERSANT .....	27
TABEAU 13: LONGUEUR DES OUEDS PERMANENTS ET TEMPORAIRES PAR SOUS-BASSIN VERSANT .....	31
TABEAU 14: CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE PAR SOUS-BASSIN VERSANT .....	33
TABEAU 15: CLASSIFICATION DE LA TEXTURE (SELON SMITH 1950) .....	35
TABEAU 16: DENSITE DE DRAINAGE PAR SOUS-BASSIN VERSANT .....	36
TABEAU 17 : LES COORDONNEES DES STATIONS METEOROLOGIQUES .....	38
TABEAU 18 : PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « COTIERS CONSTANTINOIS » .....	40
TABEAU 19 : PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « SEYBOUSE » .....	41
TABEAU 20 : PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « KEBIR-RHUMEL » .....	42
TABEAU 21 : PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « MEDJERDA » ..	43
TABEAU 22 : PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « HAUTS PLATEAUX » .....	44
TABEAU 23 : TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1981 ET 2021 POUR LE BASSIN « COTIERS CONSTANTINOIS » .....	46
TABEAU 24 : TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1971 ET 2021 POUR LE BASSIN « SEYBOUSE » ..	46
TABEAU 25 : TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1971 ET 2021 POUR LE BASSIN « KEBIR-RHUMEL » .....	47
TABEAU 26 : TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1971 ET 2021 POUR LE BASSIN « MEDJERDA » ..	48

<i>TABLEAU 27 : TEMPERATURES MOYENNE MENSUELLE ENTRE 1971 ET 2021 POUR LE BASSIN « HAUTS PLATEAUX » .....</i>	<i>49</i>
<i>TABLEAU 28 : VALEURS DE L'INDICE D'ARIDITE ANNUEL .....</i>	<i>51</i>
<i>TABLEAU 29 : VALEURS DE L'INDICE D'ARIDITE MENSUEL .....</i>	<i>52</i>
<i>TABLEAU 30 : CLASSIFICATION DES SECHERESSES SELON LES VALEURS DE SPI.....</i>	<i>78</i>
<i>TABLEAU 31 : CLASSIFICATION DES SECHERESSES SELON LES VALEURS DE RDI.....</i>	<i>84</i>
<i>TABLEAU 32 : DESCRIPTION DES DONNEES UTILISES DANS L'ETUDE.....</i>	<i>89</i>
<i>TABLEAU 33 : CLASSES DERIVEES DE LA METHODE DE CLUSTERING K-MEANS.....</i>	<i>109</i>
<i>TABLEAU 34 : ÉVALUATION DE L'EXACTITUDE PAR MATRICE DE CONFUSION .....</i>	<i>112</i>
<i>TABLEAU 35 : CLASSES DE SECHERESSE AGRICOLE .....</i>	<i>112</i>





# *Introduction générale*



## **Introduction générale**

La sécheresse est un désastre naturel qui a des conséquences considérables dans les domaines socio-économiques, environnementaux et agricoles. Elle est caractérisée par un approvisionnement insuffisant en humidité résultant, soit des précipitations persistantes inférieures à la moyenne, de la distribution erratique des précipitations ou d'un besoin en eau plus élevé (Chary et al., 2010), et donc, elle a attiré beaucoup d'attention des environmentalistes, écologistes, hydrologues, météorologues, géologues et agronomes (Mishra et Singh, 2010). Les types de sécheresse sont généralement classés en quatre catégories : météorologique, agricole, hydrologique, et socio-économique (Wilhite et Glantz, 1985 ; Hennessy et al., 2008). La sécheresse météorologique résulte de la réduction des précipitations, ce qui conduit à des pénuries d'eau anormales dans une certaine période de temps, tandis que la sécheresse agricole se produit en raison du manque d'humidité du sol, ce qui affecte la croissance des plantes. La sécheresse hydrologique se produit lorsque la quantité d'eau souterraine et de surface, comme les réservoirs et les lacs, diminue (Wilhite, 2000), et la cause de la sécheresse socio-économique est principalement liée à l'offre nécessaire pour répondre aux demandes de ressources en eau.

L'Algérie est principalement située dans les zones arides et semi-arides du bassin méditerranéen, et l'impact de la sécheresse est un problème très grave en raison des fortes fluctuations des précipitations. Une étude récente par Zerouali et al. (2021) a rapporté que la sécheresse étendue et sévère a été détectée pendant quelques années (c'est-à-dire, 1970, 1980 et 1990). Ces épisodes de sécheresse sont considérés comme étant liés aux effets du changement climatique, selon des travaux antérieurs menés par Bouznad et al. (2020) et Schilling et al. (2020).

La région hydrographique du Constantinois-Seybouse Mellegue (CSM) possède des ressources en eau de surface et en eau souterraine vitales pour le développement socio-économique du pays. Dans cette zone d'étude, la population a atteint plus de 8 210 468 habitants en 2012 (ABH, 2013), et elle était fortement concentrée dans les zones d'agglomération les plus importantes. Cependant, le manque d'eau semble être la principale contrainte au développement du secteur agricole dans la région. La sécheresse agricole est étroitement liée aux conséquences de la sécheresse météorologique et hydrologique, et elle entraîne des répercussions importantes sur les moyens de subsistance et l'économie d'une vaste portion de la population.

Très peu d'études ont été menées dans le Nord-est de l'Algérie concernant les précipitations et la température par rapport aux autres régions (Boudiaf et al., 2020 ; Bessaklia et al., 2018 ; Mrad et al., 2018).

La sécheresse agricole est étroitement liée à la sécheresse météorologique, dans laquelle la sécheresse agricole est un impact de la sécheresse météorologique (Marufah et al., 2017). Plusieurs études ont été effectuées pour analyser la relation entre les indices de sécheresse météorologique et agricole (Dhakar et al., 2013 ; Senamaw et al., 2021 ; Gidey et al., 2018 ; Wang et al., 2021 ; Zheng et al., 2021).

De nombreuses méthodes et indices sont utilisés pour surveiller les événements de sécheresse ; les méthodes météorologiques sont les plus populaires et sont basées uniquement sur les précipitations moyennes et la température. Cependant, plusieurs indices de sécheresse ont été développés pour étudier les conditions météorologiques de sécheresse, tels que l'indice de précipitation standardisé (SPI) (McKee et al., 1993), l'indice d'évapotranspiration de précipitation standardisé (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010), l'indice de gravité de sécheresse de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965) et l'indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI) (Tsakiris et al., 2007). Les applications et la disponibilité de ces indices dépendent énormément de la distribution des stations météorologiques, alors que la télédétection est un outil efficace pour réaliser une surveillance synoptique de la sécheresse sur de vastes régions (Sur et al., 2015).

La télédétection et le système d'information géographique (SIG) sont utilisés depuis quelques années pour surveiller divers problèmes environnementaux (Abdrabbo et al., 2012). Ils jouent un rôle important dans la surveillance des conditions de sécheresse (Mladenova et al., 2014).

Avec le développement de la technologie de télédétection, des indices de sécheresse basés sur des données de télédétection ont été proposés et utilisés. Ces indices peuvent fournir une large couverture et un suivi continu dans l'espace et dans le temps, principalement en raison de leur capacité à couvrir une variété d'échelles spatiales avec un coût relativement modéré pour les utilisateurs, ainsi qu'une couverture spatiale étendue et une fréquence élevée (Cammalleri et al., 2019). De nombreux indices basés sur des données de télédétection ont été proposés pour surveiller la sécheresse (Ali et al., 2021 ; Jiao et al., 2019 ; West et al., 2019 ; Zhang et Jia, 2013), tels que l'indice de santé de la végétation (VHI) (Kogan et Guo, 2015 ; Cunha et al., 2019), l'indice de condition de température (TCI) et l'indice de condition de végétation (VCI) qui ont été développés par Kogan (1995) et Park (2008), ainsi que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Récemment, de nombreux auteurs ont développé divers outils de cartographie de la sécheresse et des techniques de prévision pour la surveillance de la sécheresse. Ils ont montré l'efficacité de ces derniers, tels que le réseau de neurones et le processus hiérarchique analytique flou (Dikshit et al., 2021 ; Hoque et al., 2021). Plusieurs études couvrant une longue période d'étude dans différents types de couverture terrestre ont révélé une corrélation significative entre un indice basé sur la télédétection et un indice de sécheresse basé sur la météorologie (Cunha et al., 2019).

En fait, Beaudin (2007) a évalué le potentiel de l'imagerie satellitaire pour la surveillance de la sécheresse dans le sud de l'Espagne. Il a constaté que les relations entre le VCI, le TCI et le SPI étaient généralement significatives pendant la sécheresse. À partir de ce point, il semble que la surveillance de la sécheresse par télédétection soit plus fiable dans l'environnement méditerranéen.

Il existe un consensus sur l'augmentation de la sécheresse au cours des dernières décennies et dans les scénarios climatiques futurs pour la plupart des parties du bassin méditerranéen (Ben Abdelmalek et Nouiri, 2020 ; Tramblay et al., 2020).

Les études précédentes dans la région du CSM n'ont utilisé que l'indice météorologique. Par exemple, Merabti et al. (2017) ont comparé les indices de sécheresse SPI et RDI dans le Nord-Est de l'Algérie, concluant que les deux indices ont révélé une plus grande sensibilité à la sécheresse lorsqu'ils sont appliqués aux régions arides et semi-arides. La plupart des études se sont concentrées sur la sécheresse météorologique, tandis que des études limitées ont décrit la sécheresse agricole dans son ensemble dans le Nord-est de l'Algérie.

Cette étude a principalement deux objectifs. Le premier est d'évaluer la sécheresse dans l'état d'une série chronologique actuelle et de faire la régionalisation des paramètres climatiques et des indices de sécheresse en calculant le VHI à différentes échelles de temps basé sur le NDVI, la LST, le VCI et le TCI. Ensuite, l'application de l'algorithme de clustering K-means sur le VHI pour trouver différents clusters avec des caractéristiques de sécheresse distinctes.

Le second objectif est l'évaluation de l'intensité de la sécheresse agricole pour analyser les distributions spatio-temporelles des sécheresses et pour cartographier les zones les plus vulnérables au phénomène de sécheresse dans la zone d'étude du Nord-est de l'Algérie pendant deux décennies (2000 à 2020).



# Partie I

## Cadre Générale

Chapitre 01 : Description de la zone d'étude

Chapitre 02 : Caractéristiques morphométriques de la région





# **Chapitre I**

## *Description de la zone d'étude*



## Chapitre I : Description de la zone d'étude

### 1. Présentation de la région d'étude

Selon le découpage hydrographique, le territoire algérien est actuellement subdivisé en cinq régions hydrographiques qui sont gérées, depuis 1996, par des agences dénommées Agence de Bassin Hydrologique (ABH) ( figure 1.a) :

- Région 1 : Oranais-Chott Chergui ;
- Région 2 : Chellif-Zahrez ;
- Région 3 : Algérois-Soummam-Hodna ;
- Région 4 : Constantinois-Seybouse-Mellegue ;
- Région 5 : Sahara.

Tableau 1: les régions hydrographiques et leurs bassins versants

Bassins hydrographiques	Superficie (km <sup>2</sup> )	Bassins versants	Code BV
Oranais-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais	BV04
		Macta	BV11
		Tafna	BV16
		Chott Chergui	BV08
Chellif-Zahrez	56 227	Chélif	BV01
		Chott Zahrez	BV17
		Côtiers Dahra	BV02A
Algérois-Soummam-Hodna	47 431	Chott Hodna	BV05
		Côtiers algérois	BV02B
		Isser	BV09
		Soummam	BV15
Constantinois-Seybouse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois	BV03
		Kébir Rhumel	BV10
		Medjerdah Mellegue	BV12
		Seybousse	BV14
		Hauts Plateaux Constantinois	BV07
Sahara	2 018 054	Chott Melghir	BV06
		Sahara	BV13

Ces cinq régions hydrographiques sont divisées en 17 bassins hydrographiques (tableau 1). Les bassins versants sont regroupés en trois zones (ANRH, 1993):

- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au nord de l'Algérie.
- Les bassins endoréiques occupant les Hautes Plaines dont les eaux se perdent en grande partie par évaporation dans les chotts.
- Les bassins sahariens caractérisés par la présence des eaux fossiles.

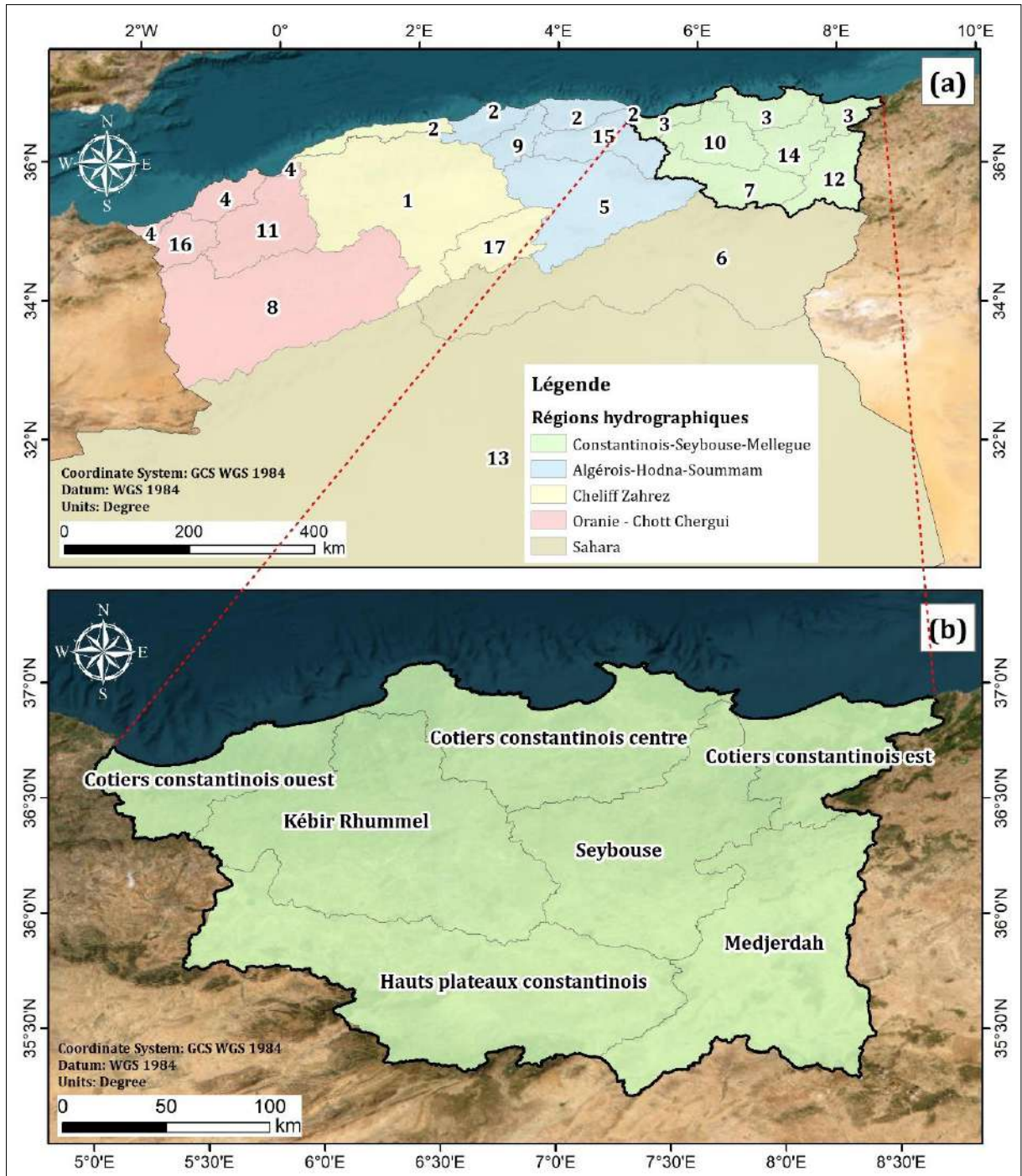


Figure 1 : Limites et Localisation de la région hydrographique Constantinois Seybouse Mellegue (découpage selon ANRH)



La région d'étude concerne le bassin hydrographique de la Constantinois Seybouse Mellegue. Il est situé au Nord-est algérien. Il s'étend de 5°00 à 8°50 de longitude Est, et de 35° à 37° de latitude Nord. Cette zone est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par les frontières tunisiennes, à l'Ouest par le bassin « Algérois-Hodna-Soumam » et au Sud par Chott Melghir.

Cinq grands bassins versants sont à distinguer (figure 1.b) : les Côtiers constantinois (03), le Kébir-Rhumel (10), la Seybouse (14), les Hauts plateaux constantinois (7) et la Medjerda-Mellegue (12). La zone d'étude s'étend sur une superficie de 44 438 km<sup>2</sup> et englobe 14 wilayas, pour une population totale en 2012 de 8210468 habitants (ABH, 2013). Sur le plan administratif, le secteur d'étude couvre totalement neuf wilayas (Fig.2) : Jijel, Mila, Skikda, Constantine, Guelma, Annaba, El Tarf, Souk Ahras et Oum El Bouaghi. Partiellement cinq wilayas : Bejaia, Sétif, Batna, Khenchela et Tébessa.

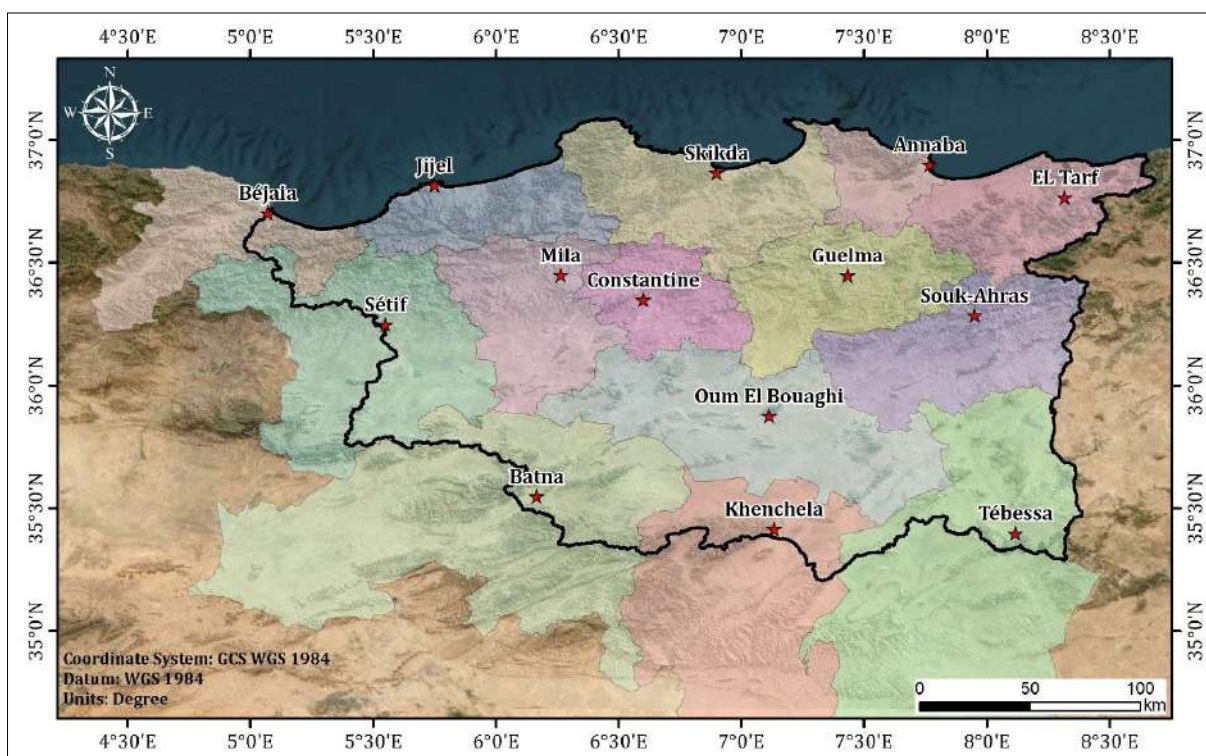


Figure 2 : Découpage administratif de la région hydrographique Constantinois Seybouse Mellegue

## 2. Aperçu socio-économique

La région hydrographique du Constantinois-Seybouse Mellegue a une population estimée à 8210468 habitants (ABH, 2013). Cette population est fortement concentrée dans les agglomérations les plus importantes, telles que les chefs-lieux de wilayas, de daïras et de communes (tableau 2). Le tableau ci-après, montre le nombre de population répartie sur les quatorze wilayas qui occupent l'ensemble du bassin.

Tableau 2: Répartition de la population par Wilayas dans le bassin de la Constantinois Seybouse  
Mellegue

Wilayas	Code	Population	Surface (Km <sup>2</sup> )
Jijel	18	765296	2402.90
Mila	43	947288	3506.86
Skikda	21	1117329	4142.64
Constantine	25	1184172	2244.76
Guelma	24	586425	3684.1
Annaba	23	717776	1414.25
El Tarf	36	515935	2888.33
Souk Ahras	41	573063	4221.89
Oum El Bouaghi	04	817094	6258.18
Bejaia	06	10695	799.26
Sétif	19	77280	3491.46
Batna	05	16999	3320.68

L'agriculture est observée dans l'ensemble de la zone, avec une très grande variété de cultures céréalières, maraîchères et arboricoles. L'irrigation est soit traditionnelle gravitaire, soit moderne (par canaux d'aspersion), selon le type de culture.

Les sols irrigables s'étendent sur 30500 ha et les besoins globaux d'irrigation sont estimés à 239 hm<sup>3</sup>/an, dans le bassin du Kébir-Rhumel (Mebarki, 2005).

L'irrigation dans le bassin de la Seybouse occupe une superficie de 13976 hectares, dont l'irrigation traditionnelle (gravitaire) dans le sous-bassin du Haut Charef, et l'irrigation moderne (par aspersion) dans la moyenne et basse Seybouse (Louati, 2020).

La région de Guelma totalise une superficie agricole de 370.013 hectares, dont 187.400 hectares de superficie agricole utile (SAU), où les céréales occupent annuellement 45 % (186 122 ha), suivi par les cultures maraîchères et industrielles (30%). Le reste étant reparté entre les différentes espèces arboricoles (Slatni, 2014).

Par son répertoire économique varié, la région est caractérisée par la diversification de ses attraits commerciaux ainsi que sur l'étendue des compétences des industriels qui offrent leurs services sur le territoire de la région et participent ainsi au développement économique de leur région (ABH, 2013).

Pôle économique important :

- *Grands centres urbains* : Constantine, Annaba, Skikda, Guelma, Batna.
- *Grandes unités industrielles* : Complexe pétrochimique (Skikda), Complexe de Sidérurgie d'El Hadjar (Annaba), Usine de détergents (Henckel) de Chelghoum El Aid (Mila).

### 3. Principales caractéristiques physiques du bassin versant du CSM

#### 3.1. Relief

Le relief de la région hydrographique de la Constantinois Seybouse Mellegue est représenté par les montagnes telliennes qui sont sous forme de bourrelet longeant et dominant la mer Méditerranée de Bejaia jusqu'à la frontière tunisienne. Il s'agit d'une chaîne de 300 km de longueur et de 50 à 80 km de largeur (Marre,1992).

La carte altimétrique donne plus de détails sur la morphologie du bassin versant. En effet la figure 3 de la répartition altimétrique nous permet de dégager les formes du relief les plus caractéristiques du bassin versant ainsi que leurs altitudes. On distingue quatre tranches d'altitude selon un axe Nord-Sud :

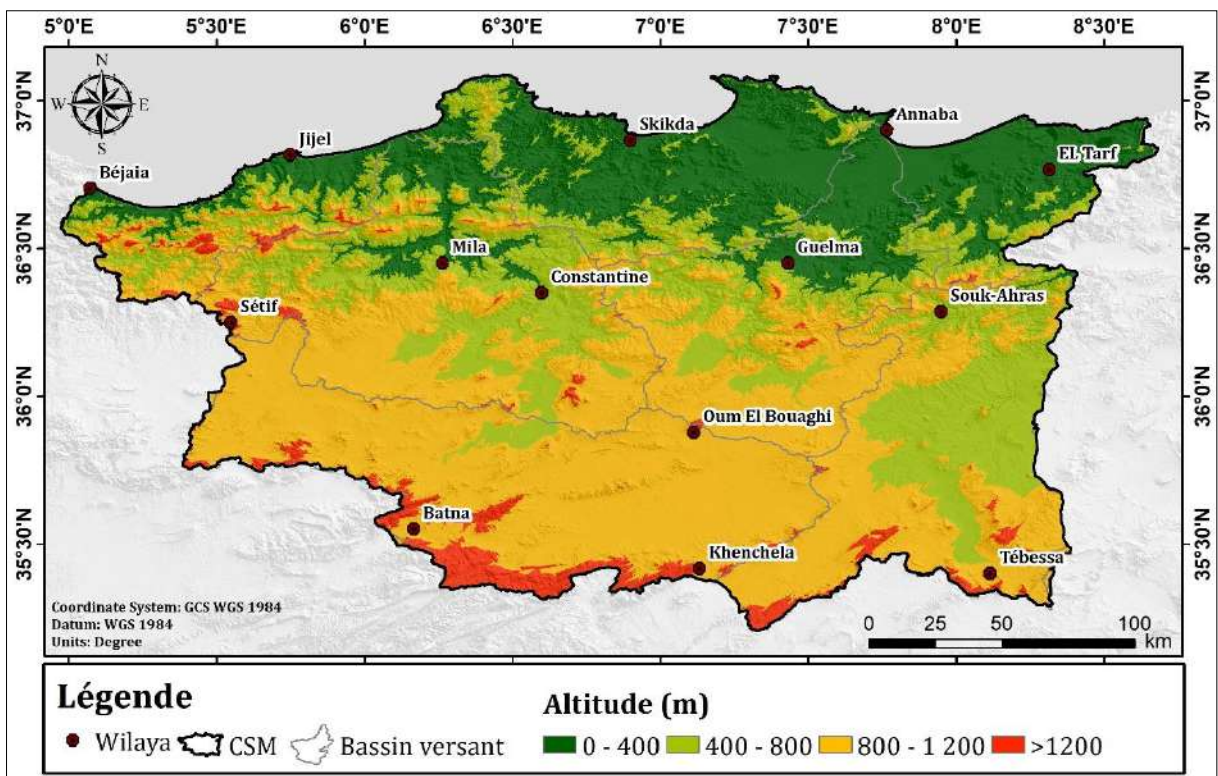


Figure 3 : Carte altimétrique

La première tranche d'altitude, allant de 0 à 400 m cette tranche est représentée au Nord par la bande côtière qui constitue partiellement l'Atlas Tellien . Elle commence de l'Ouest vers l'Est par la vallée de la Soummam, les plaines et les collines de Jijel, les vallées des oueds Guebli et Safsaf, la dépression de Azzaba, les plaines de Guerbes, et à l'Est celles de Annaba-Skikda, les plaines de Annaba et Tarf, ainsi que les collines côtières d'El-Kala. Entre l'altitude 400 et 800 m, cette zone est représentée par les monts de Collo, Skikda-l'Eddough, les hautes plaines de Chelghoum-Laid, Sadrata-Taoura, Oum-El-Bouaghi, Ain-Beida, El-Madher-Chemora, Bir-El-Ater, ainsi que les collines d'Oued Zenati.

La tranche d'altitude de 800 à 1200 m, cette tranche est représentée par les hautes plaines de Setif, celles de Khenchela et de Ain-Djasser.

D'une altitude variant de 1200 jusqu'à 2200 m, elles sont représentées par les massifs de Sétif (Ain Abessa et Boutaleb), ceux des Aurès (El-Mahmel 2200 m) et les monts de Tébessa (Abdeddaim, 2018).

### 3.2. Pentes

La carte des pentes établie a été réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide de logiciels ArcGis, en utilisant le module: *Spatial Analyst tools* → *surface* → *Slope*. Nous obtenons donc une carte des pentes en pourcent avec une subdivision de six classes (« < 5% », « 5% - 10% », « 10% - 15% », « 15% - 25% », « 25% - 30% » et « > 30% »).

Les pentes conditionnent fortement le ruissellement au niveau d'un bassin versant.

Tableau 3: Répartition du relief par classe des pentes

Classes %	Superficie en km <sup>2</sup>	% de la superficie totale	Classe des pentes
< 5	20937.39	47.12	Pentes très faibles
5 - 10	9483.92	21.34	Pentes faibles
10 - 15	6353.94	14.30	Pentes assez faibles
15 - 25	5742.28	12.92	Pentes moyennes
25 - 30	1067.80	2.3	Pentes fortes
>30	852.68	2	Pentes très faibles

Les pentes (supérieur à 30%) sont concentrées dans les zones montagneuses, représentant un faible pourcentage, presque égal à 2% de la surface du bassin. Cette classe est fréquente où les altitudes sont élevées au Nord (Bassin des Côtiers Constantinois), où se trouvent les fortes déclivités, et au Sud (Bassin des Hauts-Plateaux Constantinois). Ces zones sont caractérisées par un potentiel de ruissellement élevé (figure 4). Cette classe de pente décroît progressivement en allant vers la partie centrale du bassin ou elle devient fortes à moyenne. Les classes (25-30%) et (15-25%) sont essentiellement localisées dans les zones à altitude plus ou moins élevée, où se trouvent les hautes plaines et les collines mentionnées précédemment. Les deux classes (10-15%) et (5-10%) restent relativement faible et marquent spatialement la bande située entre le Nord et le Sud. On les rencontre sur les hautes plaines et les collines déjà décrites.

La classe de pente prédominante varie entre 0 et 5% couvrant ainsi plus de 47 % de la surface du bassin. Les pentes deviennent faibles à très faibles en aval. Cette classe apparaît sur les vallées des oueds Guebli et Safsaf, les plaines de Guerbes, ainsi que celles d'Annaba-Skikda, les plaines d'Annaba et Tarf. Ainsi, les pentes inférieures à 5% semblent importantes dans la région d'étude.

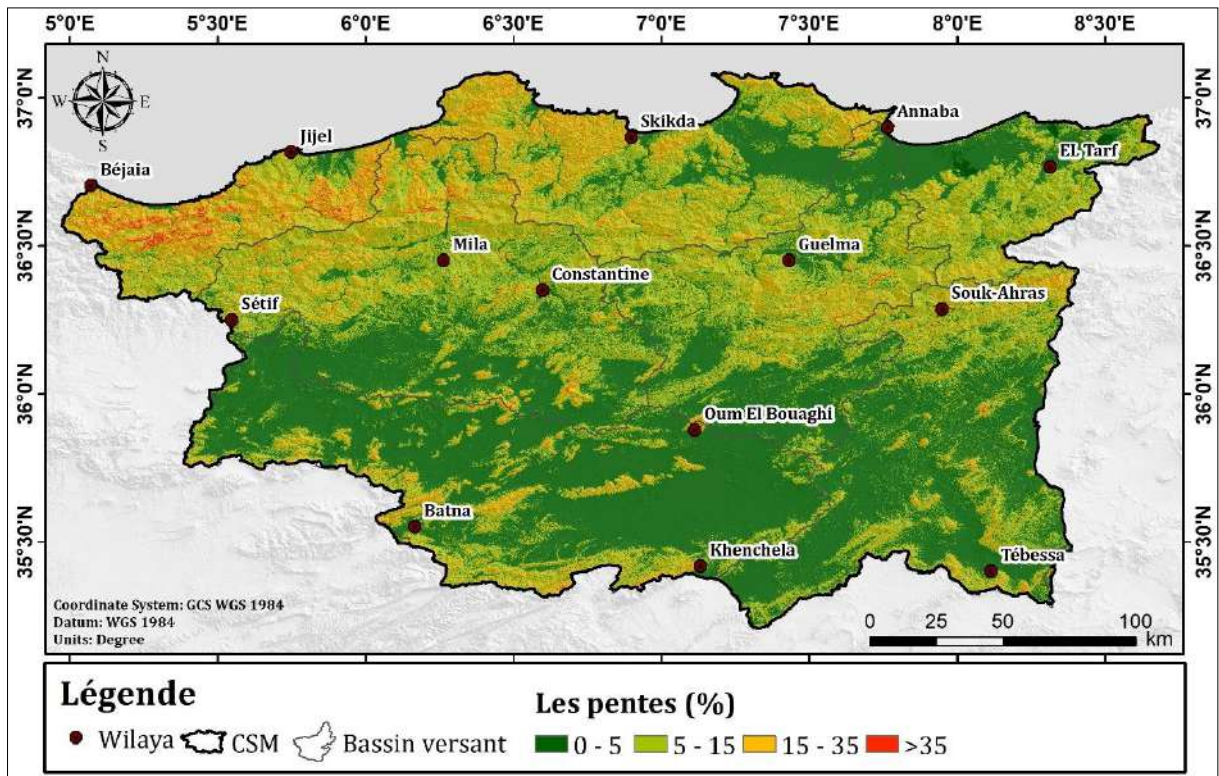


Figure 4 : Carte des pentes

#### 4. Occupation du sol

La carte d'occupation des sols a été établie à partir d'une base des données raster de très haute résolution (Sentinel 1 et 2 de 10 m LU/LC) obtenu de la plateforme WorldCover de l'Agence spatiale européenne (ESA). La carte LULC des sols a été reclassée en huit classes d'occupation du sol qui sont : Surface d'eau, Forêt, Terre herbacée, Végétation inondée, Terres cultivées, Broussailles/arbustes, Surface urbaine et Sol nu (ESA, 2020).

Tableau 4: Les surfaces de chaque classe d'occupation des sols

Classe d'occupation des sols	Surface en km <sup>2</sup>	Surface en %
Surface d'eau	266.36	0.6
Forêt	8212.82	18.5
Terre herbacée	310.76	0.7
Végétation inondée	44.39	0.1
Terres cultivées	14161.56	31.9
Broussailles/arbustes	17535.47	39.5
Surface urbaine	2885.58	6.5
Sol nu	1021.05	2.3

L'occupation du sol de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité du Sahara au Sud et de la mer méditerranéenne au Nord.

La zone d'étude contient huit classes d'occupation du sol, variant du nord au sud (figure 5). Le principal type d'occupation du sol dans la zone d'étude est les broussailles/arbustes, représentant environ de 39,5 % de la superficie totale. Il s'étend largement au niveau de l'Atlas Tellien et du Sud des Hauts-Plateaux. Ce reboisement se trouve suite à l'installation du barrage vert qui occupe la bordure septentrionale du Sahara et les quelques surfaces forestières (Chêne, liège) localisées dans la bande des monts côtiers de Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba et El-Kala. Il se trouve également entre le littoral et une ligne qui passe approximativement par Guelma et Souk-Ahras (Abdeddaim, 2018). Les terres cultivées (31,9%) se situent dans les plaines côtières au nord et dans le bassin de la Medjerda au sud. Les forêts (18,5%) couvrent largement la chaîne de montagnes au nord de la zone d'étude et au niveau des monts des Aurès. Les surfaces urbaines (6,5 %) sont fortement concentrées dans les provinces. Le reste de l'occupation du sol qui est réparti dans toute la zone d'étude par petites portions, comprend : le sol nu (2,3%), la terre herbacée (0,7%), la surface d'eau (0,6%), et la végétation inondée (0,1%).

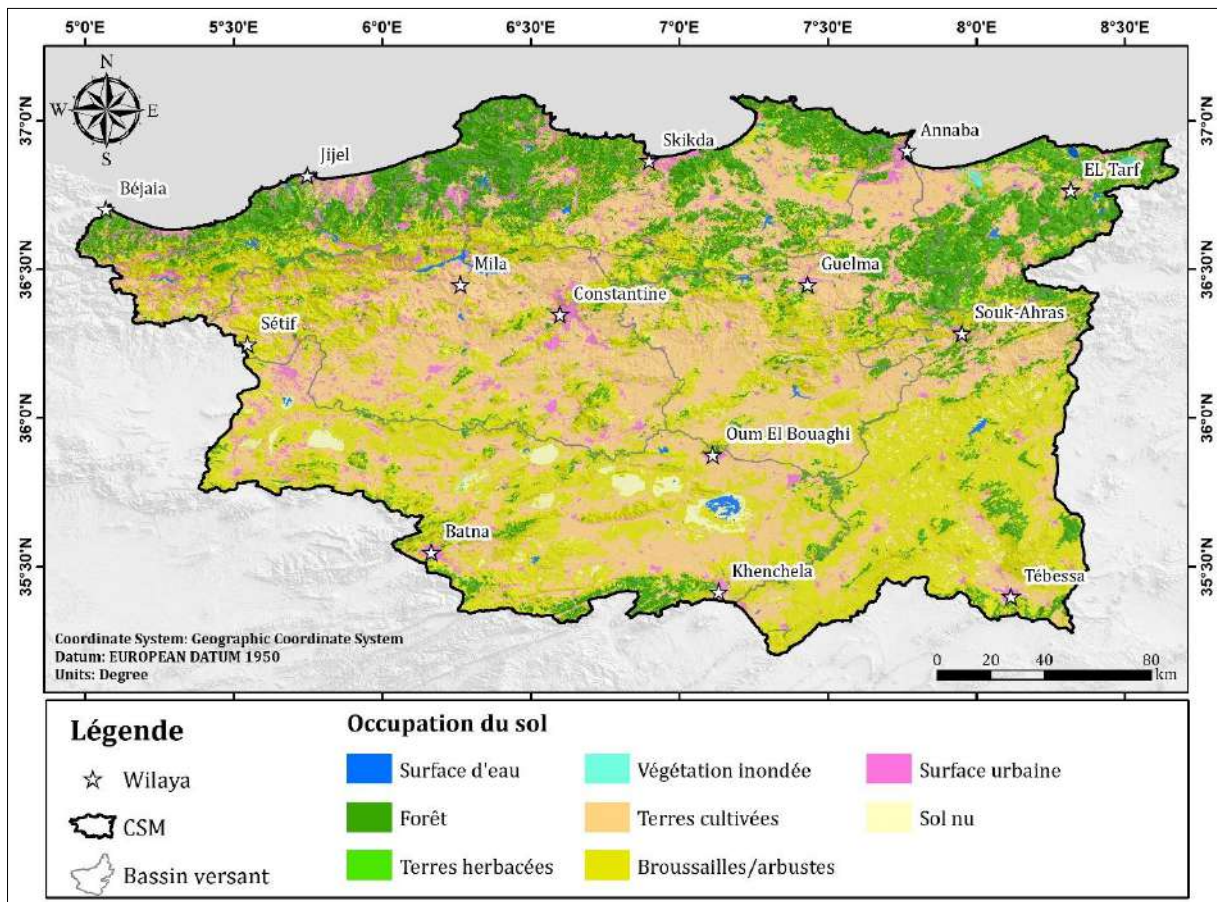


Figure 5 : Carte d'occupation du sol (ESA WorldCover 2020)

## 5. Pédologie

La carte des types de sol a été obtenue par numérisation de la carte pédologique, puis elle a été classée cartographiquement en 11 entités polygonales et convertie au format Raster à l'aide du logiciel ArcGis.

Les classes pédologiques (types de sol) sont les suivantes : Sols alluviaux, Sols alluviaux basiques, Sols calcaires, Sols calcaires, Sol calciques, Sols dunaires, Sols insaturés, Sols de marais, Sols podzoliques, Roche mère et Sols salins.

Tableau 5: Les surfaces de chaque type de sol

Type de sols	Surface en km <sup>2</sup>	Surface en %
Lac	31.07	0.07
Sols alluviaux	2445.12	5.50
Sols alluviaux basiques	2725.96	6.13
Sols calcaires	14739.48	33.17
Sol calciques	10007.12	22.52
Sols dunaires	382.15	0.86
Sols insaturés	6880.41	15.48
Sols de marais	315.64	0.71
Sols podzoliques	3854.38	8.67
Roche mère	1070.53	2.41
Sols salins	1986.12	4.47

La répartition des sols au niveau de la région d'étude (figure 6) est due essentiellement au climat, la nature des roches mères, du relief, à l'eau, à la végétation et aux facteurs biotiques et anthropogènes (Farah, 2014).

Les sols les plus répandus dans ce bassin, particulièrement au Nord-ouest et au centre, sont les sols calcaires (C), qui représentent 33.17 % de la superficie totale du bassin versant. En effet, la répartition importante des roches riches en éléments carbonatés a fait dominer cette classe de sol. En seconde classe, on trouve les sols calciques qui couvrent 22.52 % de la surface. Ils sont concentrés à la partie Sud de la région d'étude. Dans la partie Nord il existe des sols insaturés de bassin avec un pourcentage de 15.48 %.

Les sols podzoliques (pd), qui représentent un pourcentage de 8.67 % de la superficie totale du bassin versant, se développent sur les terrains forestiers. Il existe également des sols alluviaux

au Sud du bassin avec un faible pourcentage entre 5.5 et 6.13%. Il sont caractérisés par un pH acide et correspondent typiquement à des sols désaturés et lessivés (Duchaufour, 1975). Les sols salins sont généralement localisés dans les chotts et les sebkhas, avec un pourcentage de 4.47% . Ils sont pauvres en matière organique, et leur salinité est chlorurée, sulfatée, sodique et magnésienne (Nedjraoui, 2003).

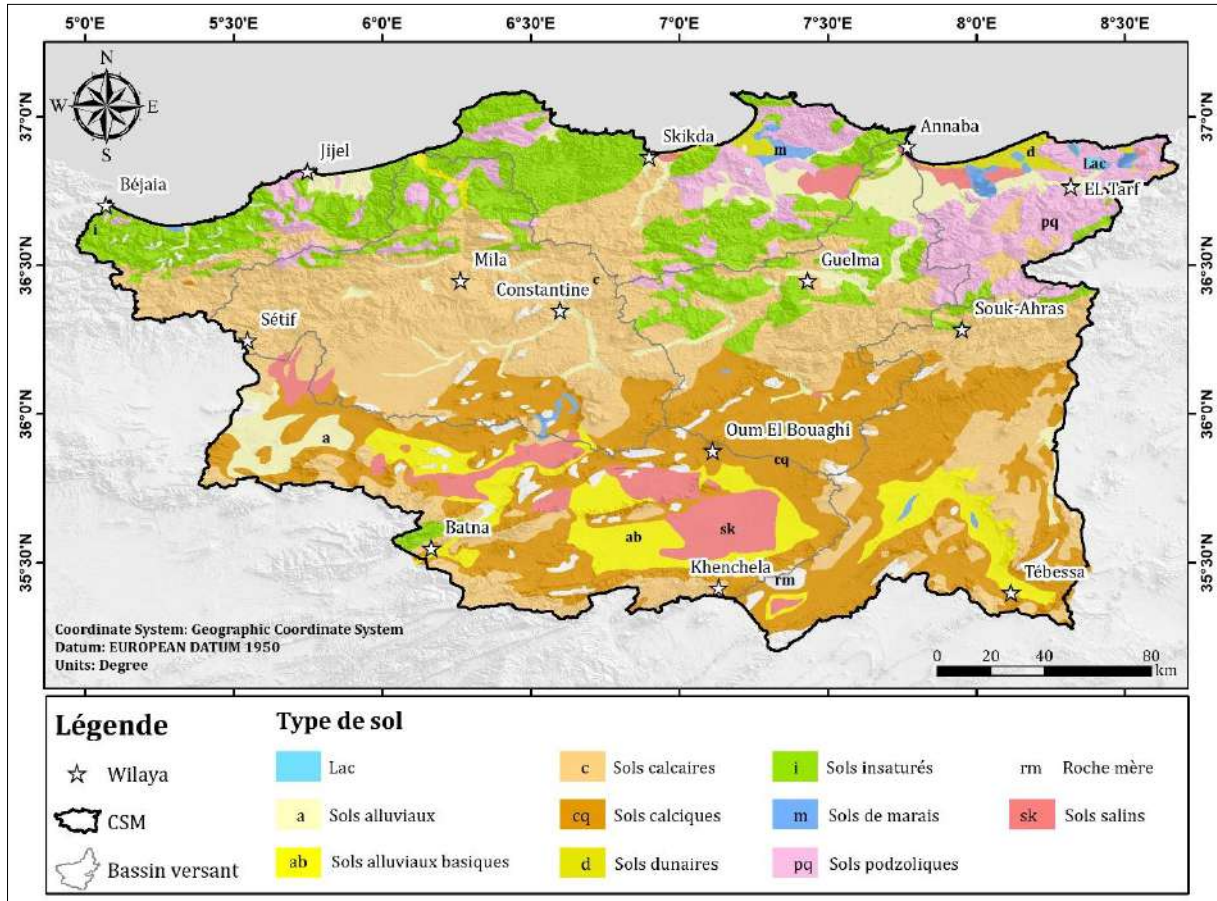


Figure 6 : Cartes des sols (extrait de la carte des Sols d'Algérie. Constantine. Feuille N.J. 32-S.O. echelle 1/500.000 éditée en 1948 par Durand, M.J-H., Barbut, M.M)

## 6. Aperçu géologique

Dans cette partie on essayera de parler sur la géologie du nord, et notamment du nord-est, où se trouve notre région d'étude.

L'Algérie est caractérisée par une géologie complexe et variable, notamment du nord au sud. Le nord de l'Algérie, ou le domaine septentrional, est composé de diverses unités géologiques et structurales, faisant partie de la chaîne alpine des Maghrébides d'âge Tertiaire (Durand-Delga, 1969). Du Nord au Sud, la zone est séparée en différentes unités au cours de phases tectoniques successives (Vila, 1980). Elles sont formées de matériaux très diversifiés On distingue :



### 6.1. Le domaine interne

Le domaine interne regroupe les massifs kabyles et leur couvert Paléozoïque ainsi, qu'une bande étroite de terrains carbonatés située plus au Sud que les massifs kabyles, datée du Trias à l'Eocène. C'est la dorsale kabyle (ou chaîne calcaire) qui est vivement plissée et écaillée par une tectonique tangentielle fini-Eocène. Selon (Durand-Delga, 1969 ; Raoult, 1974 ; Vila, 1980) la chaîne calcaire subdivisée en trois unités qui sont du nord au sud:

- **Unité interne** : une série conglomératique à sa base et se terminant par des formations calcaires d'âge Permo-triasique à Néocomien, suivi d'une lacune du Crétacé inférieur au Crétacé moyen (Vila, 1980) et un Eocène inférieur à moyen formé de calcaire néritique massifs.
- **Unité médiane**: sa base est semblable à celle de l'unité interne, sauf que la lacune concerne l'Aptien et l'Albien. Du Crétacé supérieur à l'Eocène, la série est marno-calcaire à microfaune pélagique (Vila, 1980).
- **Unité externe** : caractérisée par une série crétacée à Eocène détritique avec un faciès intermédiaire entre le domaine interne et médian du bassin maghrébin (Vila, 1980).

De point de vue structural, les zones internes sont constituées de plusieurs nappes charriées sur la plate forme saharienne. Cet ensemble de nappes est recouvert par des formations détritiques (conglomérats gréso-micacés) de l'Oligo-Miocène kabyle ou OMK (Bouillin et Raoult, 1971).

### 6.2. Le domaine des flyschs

Ce domaine correspond aux nappes de flyschs dont le matériel Crétacé-paléogène est expulsé vers le sud. Ces flyschs sont déposés dans un bassin de nature marine (Laib, 2015).

Ce domaine est composé de deux types d'unités différentes :

- **les nappes maurétanienne et massylienne** décrits par Raoult (1969) (djebels orientaux des Babor, Petite Kabylie..), séries du Crétacé inférieur formées typiquement de flyschs gréso-pélitiques ;
- **la nappe numidienne** décrits par Gelard (1979), séries gréseuses de l'Oligocène qui affleurent largement selon une orientation SW-NE, allant de Constantine-Guelma jusqu'à la Tunisie (Tabarka), ainsi que sur les chaînons de Zouagha et des Mouïas, Dj. Bou Affroun, Dj. Tamesguida, au NW du Dj. Edough, à l'Est du Cap d'El Aouna. Ces sédiments postérieurs à la tectonique fini-éocène forment un étage supérieur nettement moins tectonisé .

### 6.3. Le domaine externe

Ces éléments structuraux sont développés sur près de 100 km du Nord au Sud et supportant les empilements « normaux » des flyschs. Ce sont des « séries épaisses à dominante marneuse issues du sillon tellien », ce domaine est composé du Nord au Sud de :

- les séries *ultra-telliennes* représentées par les formations typiques du Crétacé inférieur. Elles sont constituées de formations marno-calcaires de couleur claire renfermant de riches microfaunes.
- les séries *telliennes* sont des formations marneuses et marno-calcaires du Crétacé et Paléogène (Vila, 1980), avec absence d'intercalations néritiques à caractère prépondérant.
- les séries *péni-telliennes* montrent une sédimentation à faciès néritique prépondérant du Crétacé supérieur à l'Eocène. Cette sédimentation carbonatée est proche de celle qui se dépose sur la plate forme néritique (Guechi, 2017). Elle présente des caractères proches de ceux du Néritique constantinois et des unités sud sétifiennes (figure 7).

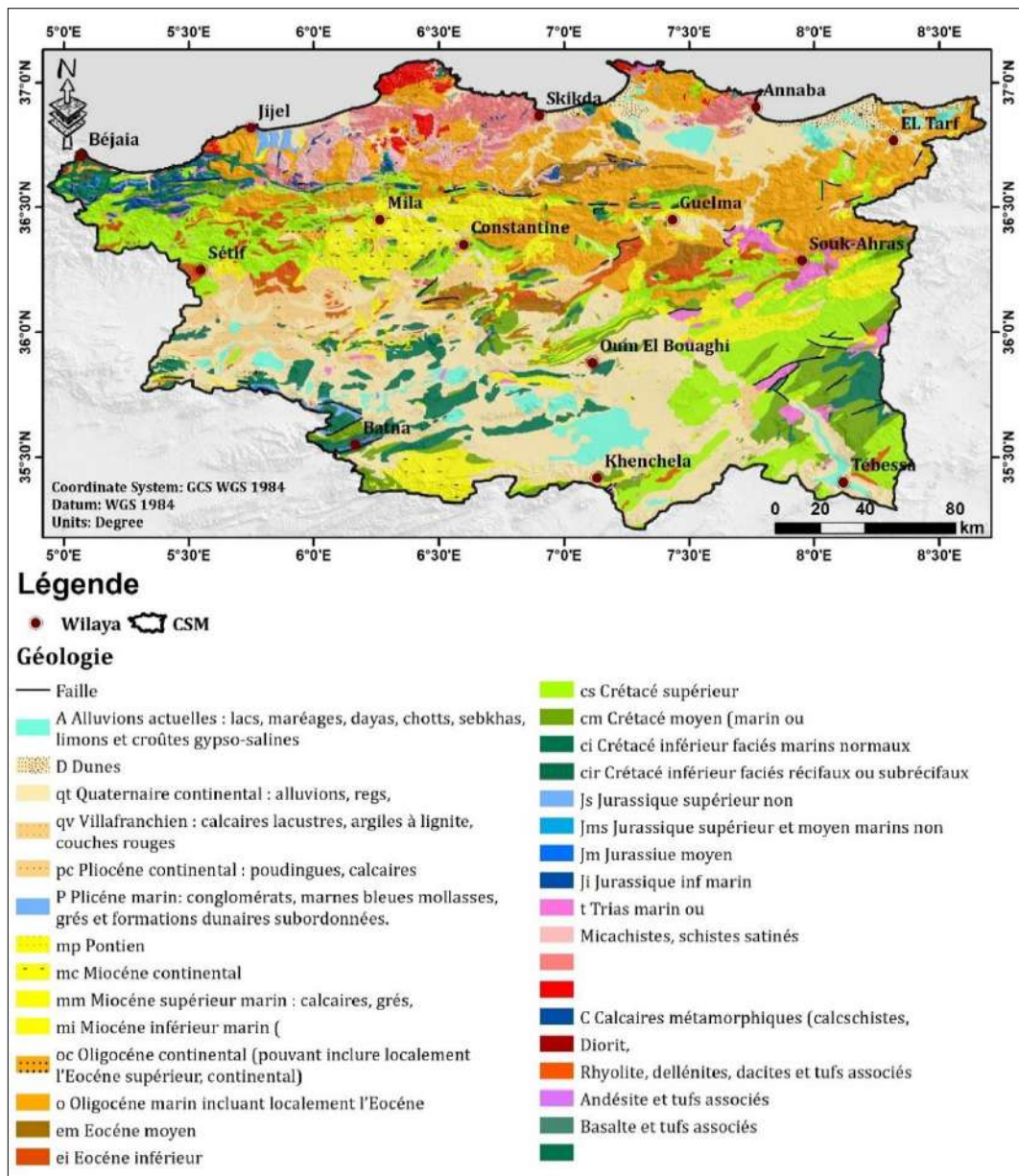


Figure 7 : Carte géologique (extrait de la carte géologique de l'Algérie -Constantine Nord-echelle 1/500.000 éditée en 1951-1952 par M. G. Bétier)



## **Chapitre II**

### *Caractéristiques morphométriques de la région*



## Chapitre II: Caractéristiques morphométriques de la région

### 1. Introduction

Les caractéristiques morphométriques du bassin influencent fortement sa réponse hydrologique et en particulier le régime d'écoulement.

Les géomorphologues américains tels que Horton, Leopold, Miller, Strahler, Schumm, etc., ont établi de nombreuses formules qui expriment généralement les relations statistiques observées entre les divers caractères morphologiques et physiques des lits et des bassins.

Trois types de paramètres morphométriques permettent d'expliquer le comportement hydrologique des bassins :

- Les paramètres de forme ;
- Les paramètres de relief ;
- Les paramètres morphométriques d'organisation du réseau hydrographique.

Plusieurs paramètres sont mesurés à l'aide des outils informatiques ArcGis, ArcHydro et bien sûr le Modèle Numérique de Terrain (MNT).

### 2. Paramètres de forme

#### 2.1. Surface et périmètre

Le bassin versant est l'aire de réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Il se caractérise par des indices géométriques qui se mesurent de façon directe et indirecte. La surface du bassin versant est la première caractéristique et la plus importante. Dans notre cas, elle est calculée par le logiciel ArcGis 10.3 après avoir tracé les limites du bassin.

La longueur de la ligne de contour du bassin est représentée par le périmètre.

L'ArcGis Est un logiciel de la firme ESRI, leader mondial des SIG. La version la plus simple du logiciel « Arc Gis desktop », « Arc View » inclut les applications Arc Catalog, Arc Map, Arc Toolbox, Ainsi que l'extension Spatial Analyst. Ces applications vous permettent d'effectuer n'importe quelle tâche SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la modification des données et le géotraitement.

ArcMap est l'application principale d'ArcGIS Desktop. Elle est divisée en deux interfaces : la visualisation et le traitement des données géographiques dans la fenêtre "Data View" et la mise en page de la carte dans la fenêtre "Layout View".

La région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) se compose, selon les délimitations orohydrographiques, de cinq (05) grands bassins : Le bassin versant de la Seybouse, le bassin versant de la Medjerda, le bassin versant du Kebir-Rhumel, le bassin

versant des Hauts Plateaux et le bassin versant des Côtiers constantinois. À son tour, il se divise en trois grands bassins : le Côtiers constantinois Ouest, le Côtiers constantinois Centre et Le Côtiers constantinois Est. Leur superficies respectives sont mentionnées dans le tableau 06.

Tableau 6: Superficie des bassins versants de la région hydrographique CSM

Bassin versant	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie %
Seybouse	6475.05	14.79
Medjerda	7743.14	17.69
Kebir-Rhumel	8821.96	20.16
Hauts Plateaux	9586.17	21.90
Côtiers constantinois	11142.12	25.46
<b>Total</b>	<b>43768.43</b>	<b>100</b>

Chaque bassin versant est subdivisé à son tour en un certain nombre de bassins élémentaires ou « sous bassin versant » correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal ( figure 08).

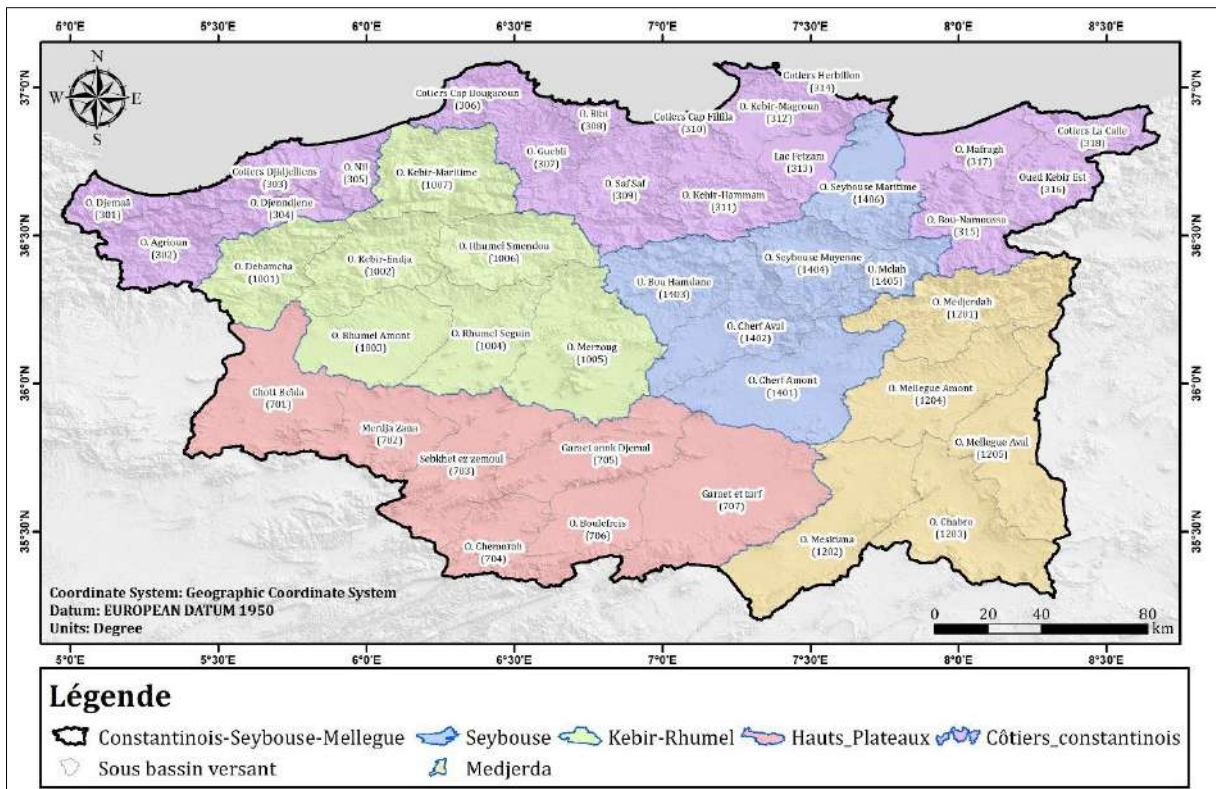


Figure 8 : Carte des sous bassins versants

## 2.2. Indice de compacité de Gravelius

Il existe différents indicateurs morphologiques pour caractériser l'environnement, et les bassins versants peuvent également être comparés entre eux. L'indice le plus couramment utilisé est

celui de Gravius (1914). Il est défini comme le rapport de la circonférence d'un bassin à la circonférence d'un cercle de même surface. Il donne une idée de la géométrie du bassin.

Le coefficient est obtenu par l'application de la formule :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

$K_G$  : indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant (km<sup>2</sup>) ;

P : périmètre du bassin versant (km),

Si :

$K_G \leq 1 \rightarrow$  Bassin versant de forme circulaire.

$K_G = 1.12 \rightarrow$  Bassin versant de forme carrée.

$K_G > 1.12 \rightarrow$  Bassin versant de forme allongée.

Les valeurs de l'indice de compacité (tableau 07) montrent que tous les bassins sont allongés, leur indice de forme reste élevée ( varie entre 1.3 à Oued RHUMEL AMONT et 3.4 à Cotiers HERBILLON).

Tableau 7:Indices de compacité par sous bassin versant

Bassin	Code SBV	Nom SOUS-BASSIN	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Indice de compacité (kc)
COTIER OUEST	0301	Oued DJEMAA	379.54	97.79	1.41
	0302	Oued AGRIOUN	934.26	168.67	1.55
	0303	COTIERS JIJEL	561.34	149.25	1.76
	0304	Oued DJENDJEN	526.54	166.29	2.03
	0305	Oued NIL	357.54	105.71	1.57
COTIER CENTRE	0306	COTIERS CAP BOUGAROUN	490.35	146.78	1.86
	0307	Oued GUEBLI	989.14	175.85	1.57
	0308	Oued BIBI	201.88	95.13	1.87
	0309	Oued SAF SAF	1169.89	192.11	1.57
	0310	COTIERS FILFILA	136.37	83.37	2.00
	0311	Oued KEBIR-HAMMAM	1128.93	179.74	1.50
	0312	Oued KEBIR-MAGROUN	719.08	153.83	1.61
	0313	LAC FETZARA	507.11	123.44	1.53
COTIER EST	0314	COTIERS HERBILLON	199.44	175.81	3.49
	0315	Oued BOU NAMOUSSA	862.65	209.06	1.99
	0316	Oued KEBIR EST	736.77	168.45	1.74
	0317	Oued MAFRAGH	802.85	164.16	1.62
KEBIR- RHUMEL	0318	COTIERS LA CALLE	438.45	132.95	1.78
	1001	Oued DEHAMECHA	1054.88	169.30	1.46
	1002	Oued KEBIR- ENDJA	1116.36	175.50	1.47
	1003	Oued RHUMEL AMONT	1218.05	162.64	1.30
	1004	Oued RHUMEL- SEGUI N	1162.84	200.76	1.65
	1005	Oued BOU MERZOUG	1868.28	217.07	1.41

	1006	Oued RHUMEL- SMENDOU	1082.04	170.20	1.45
	1007	Oued KEBIR MARITI ME	1319.51	187.14	1.44
<b>MEDJERDA</b>	1201	Oued MEDJERDA	1491.71	254.95	1.85
	1202	Oued MESKIANA	1831.00	248.23	1.62
	1203	Oued CHABRO	1564.43	243.07	1.72
	1204	Oued MELLEGUE AMONT	1487.69	235.49	1.71
	12 05	Oued MELLEGUE AVAL	1368.31	264.81	2.00
<b>SEYBOUSE</b>	14 01	Oued CHERF AMONT	1735.17	231.70	1.56
	14 02	Oued CHERF AVAL	1197.66	199.67	1.62
	14 03	Oued BOU HAMDANE	1106.69	180.64	1.52
	14 04	Oued SEYBOUSE MOYENNE	820.25	138.78	1.36
	14 05	Oued MELAH	553.10	149.73	1.78
	14 06	Oued SEYBOUSE MARITI ME	1062.18	180.68	1.55
<b>HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS</b>	07 01	CHOTT BEIDA	1603.79	242.82	1.70
	07 02	MERDJA ZANA	1034.37	170.25	1.48
	07 03	SEBKHET EZ ZEMOUL	1554.65	255.29	1.81
	07 04	Oued CHEMORAH	765.88	145.22	1.47
	07 05	GARAET ANNK DJEM	1244.34	202.26	1.61
	07 06	Oued BOULEFREIS	954.31	161.04	1.46
	07 07	GARAET EL TARF	2428.82	258.97	1.47

### 2.3. Rectangle équivalent

Ce concept a été introduit pour permettre une comparaison facile des bassins versants les uns avec les autres du point de vue de l'impact des caractéristiques des bassins versants sur l'écoulement. En supposant que, dans les mêmes conditions climatiques, l'écoulement d'un bassin versant donné soit approximativement le même que celui d'un rectangle de même superficie, avec le même coefficient de Gravelius et la même distribution altimétrique, on sait que la distribution du sol, de la végétation et de la densité de drainage, dans la courbe horizontale différentes régions intermédiaires est respectée. Il s'agit donc d'une transformation purement géométrique dans laquelle le contour du bassin devient un rectangle de même périmètre, la courbe horizontale de la droite parallèle au petit côté du rectangle, et le débouché d'un des petits côtés du rectangle que nous appelons le rectangle équivalent ( Roche, 1963).

Soit  $L$  et  $I$  la longueur et la largeur du rectangle, et  $P$  et  $A$  le périmètre et l'aire du bassin versant, On a :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right)$$

Les dimensions d'un rectangle équivalent donnent une longueur égale à 4 fois la largeur.

Les valeurs de la longueur équivalente et de la largeur équivalente sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 8:longueur équivalente et largeur équivalente par sous bassin versant

Bassin	Code SBV	Nom SOUS-BASSIN	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Longueur Equivalente (km)	Largeur Equivalente (km)
<b>COTIER OUEST</b>	0301	Oued DJEMAA	379.54	97.79	39.22	9.68
	0302	OUED AGRIOUN	934.26	168.67	71.21	13.12
	0303	COTIERS JIJEL	561.34	149.25	66.14	8.49
	0304	OUED DJENDJEN	526.54	166.29	76.24	6.91
	0305	OUED NIL	357.54	105.71	44.89	7.96
<b>COTIER CENTRE</b>	0306	COTIERS CAP BOUGAROUN	490.35	146.78	65.96	7.43
	0307	OUED GUEBLI	989.14	175.85	74.68	13.25
	0308	OUED BIBI	201.88	95.13	42.86	4.71
	0309	OUED SAF SAF	1169.89	192.11	81.74	14.31
	0310	COTIERS FILFILA	136.37	83.37	38.11	3.58
	0311	OUED KEBIR-HAMMAM	1128.93	179.74	74.77	15.10
	0312	OUED KEBIR-MAGROUN	719.08	153.83	66.02	10.89
	0313	LAC FETZARA	507.11	123.44	51.96	9.76
<b>COTIER EST</b>	0314	COTIERS HERBILLON	199.44	175.81	85.57	2.33
	0315	OUED BOU NAMOUSSA	862.65	209.06	95.50	9.03
	0316	OUED KEBIR EST	736.77	168.45	74.31	9.92
	0317	OUED MAFRAGH	802.85	164.16	70.73	11.35
<b>KEBIR- RHUMEL</b>	0318	COTIERS LA CALLE	438.45	132.95	59.05	7.43
	1001	OUED DEHAMECHA	1054.88	169.30	69.47	15.19
	1002	OUED KEBIR- ENDJA	1116.36	175.50	72.31	15.44
	1003	OUED RHUMEL AMONT	1218.05	162.64	61.52	19.80
	1004	OUED RHUMEL- SEGUI N	1162.84	200.76	87.01	13.36
	1005	OUED BOU MERZOUG	1868.28	217.07	87.08	21.46
	1006	OUED RHUMEL-SMENDOU	1082.04	170.20	69.54	15.56
<b>MEDJERDA</b>	1007	OUED KEBIR MARITI ME	1319.51	187.14	76.27	17.30
	1201	OUED MEDJERDA	1491.71	254.95	114.44	13.03
	1202	OUED MESKIANA	1831.00	248.23	107.00	17.11
	1203	OUED CHABRO	1564.43	243.07	106.90	14.63
	1204	OUED MELLEQUE AMONT	1487.69	235.49	103.35	14.40
<b>SEYBOUSE</b>	1205	OUED MELLEQUE AVAL	1368.31	264.81	121.11	11.30
	14 01	OUED CHERF AMONT	1735.17	231.70	98.18	17.67
	14 02	OUED CHERF AVAL	1197.66	199.67	85.89	13.94
	14 03	OUED BOU HAMDANE	1106.69	180.64	75.70	14.62
	14 04	OUED SEYBOUSE MOYENNE	820.25	138.78	54.28	15.11
	14 05	OUED MELAH	553.10	149.73	66.55	8.31
<b>HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS</b>	14 06	OUED SEYBOUSE MARITI ME	1062.18	180.68	76.44	13.89
	07 01	CHOTT BEIDA	1603.79	242.82	106.33	15.08
	07 02	MERDJA ZANA	1034.37	170.25	70.44	14.68
	07 03	SEBKHET EZ ZEMOUL	1554.65	255.29	114.01	13.64
	07 04	OUED CHEMORAH	765.88	145.22	59.80	12.81



07 05	GARAET ANNK DJEM	1244.34	202.26	86.79	14.34
07 06	OUED BOULEFREIS	954.31	161.04	66.08	14.44
07 07	GARAET EL TARF	2428.82	258.97	106.73	22.76

### 3. Paramètres de relief

#### 3.1. La courbe hypsométrique

Étant donné que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques dépendent de l'altitude, il est important de tracer une courbe hypsométrique.

Cette courbe exprime la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle représente la surface sur l'axe des abscisses et les altitudes sur l'axe des ordonnées. les courbes hypsométriques restent un outil utile pour comparer plusieurs bassins ou différentes sections d'un seul bassin.

Les résultats des courbes hypsométriques réalisées ( figure 9, 10, 11, 12 et 13), montrent que plus de 50 % de la surface totale du bassin du Côtiers constantinois correspond à des altitudes comprises entre 200 et 800 m, et que les altitudes allant de 900 à 2000 m ( hauteur maximale) sont très peu étendues. Les zones d'altitude comprise entre 700 et 1000 m, couvrent 3845 km<sup>2</sup> dans le bassin Seybouse, soit environ 60% de la superficie total de ce bassin. Les zones d'altitude comprise entre 800 et 1100 m, couvrent 5668 km<sup>2</sup> dans le bassin Kebir-Rhumel, soit environ 64% de la superficie totale du bassin. Les zones d'altitude comprise entre 700 et 1200 m, couvrent 5469 km<sup>2</sup> dans le bassin Medjerda, soit environ 70% de la superficie totale du bassin. Dans le bassin des Hauts Plateaux. les zones d'altitude comprise entre 900 et 1100 m couvrent 7460 km<sup>2</sup> soit 78% de la superficie totale du bassin.

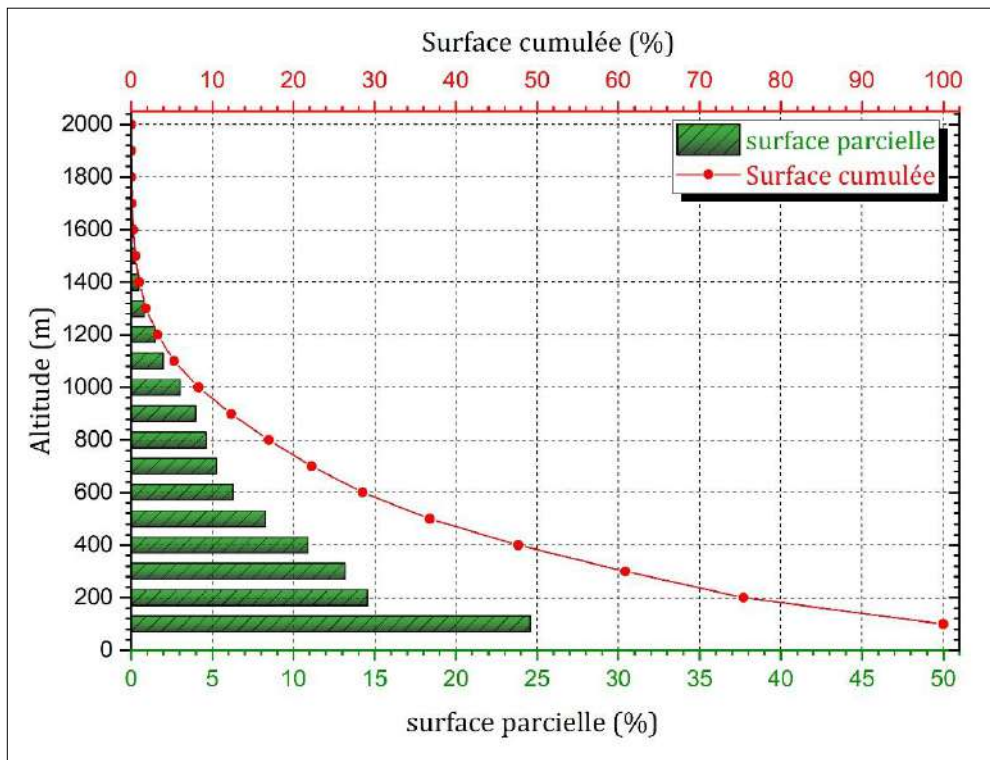


Figure 9 : Courbe hypsométrique du bassin Côtiers constantinois

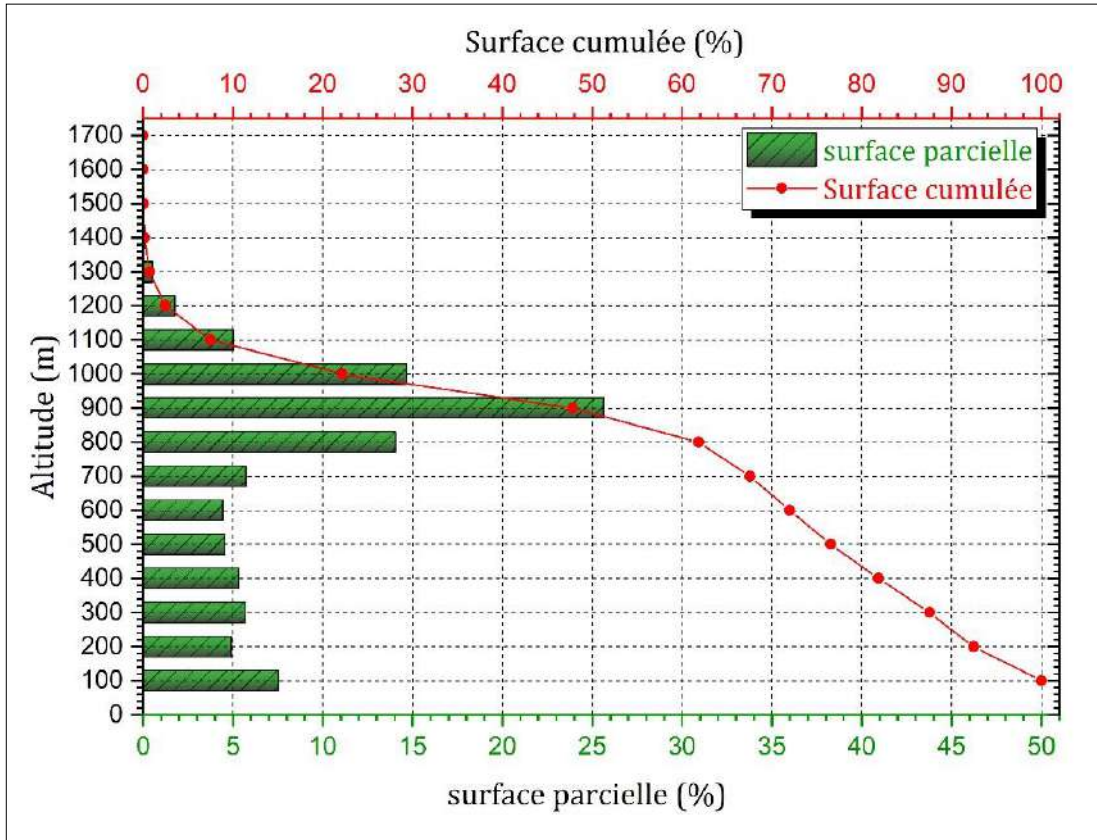


Figure 10 : Courbe hypsométrique du bassin Seybouse

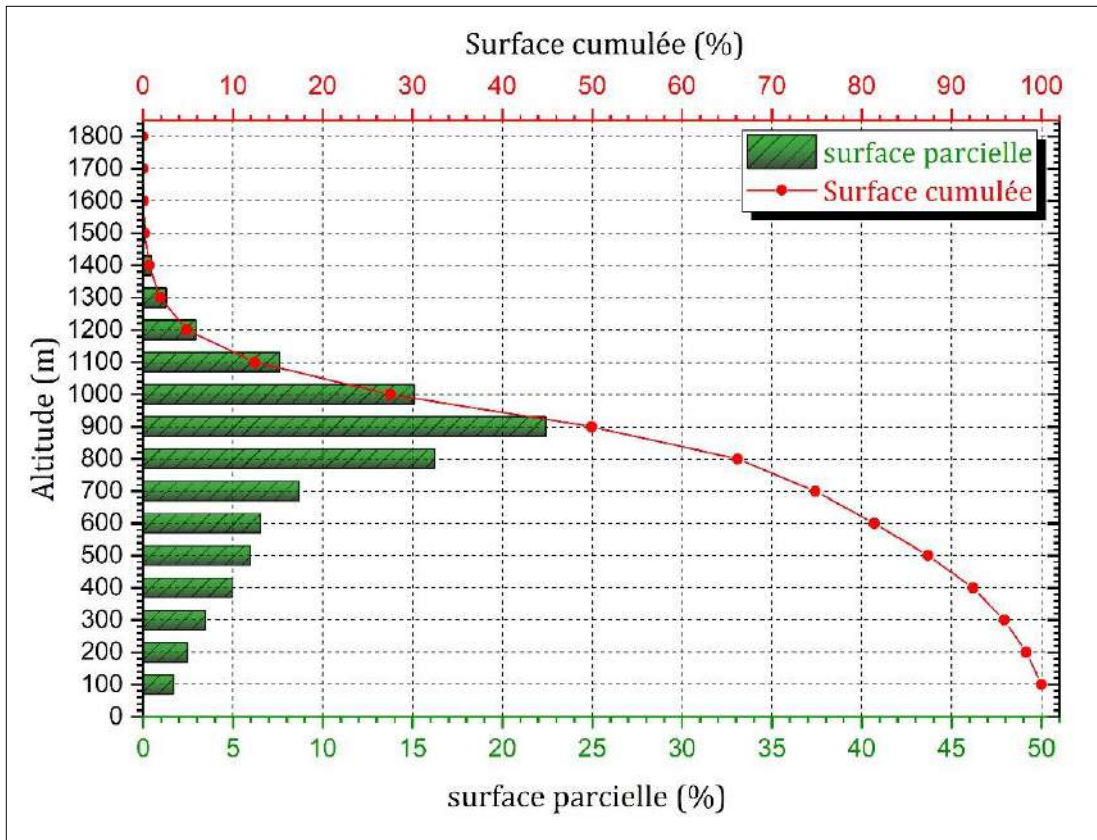


Figure 11 : Courbe hypsométrique du bassin Kebir-Rhumel

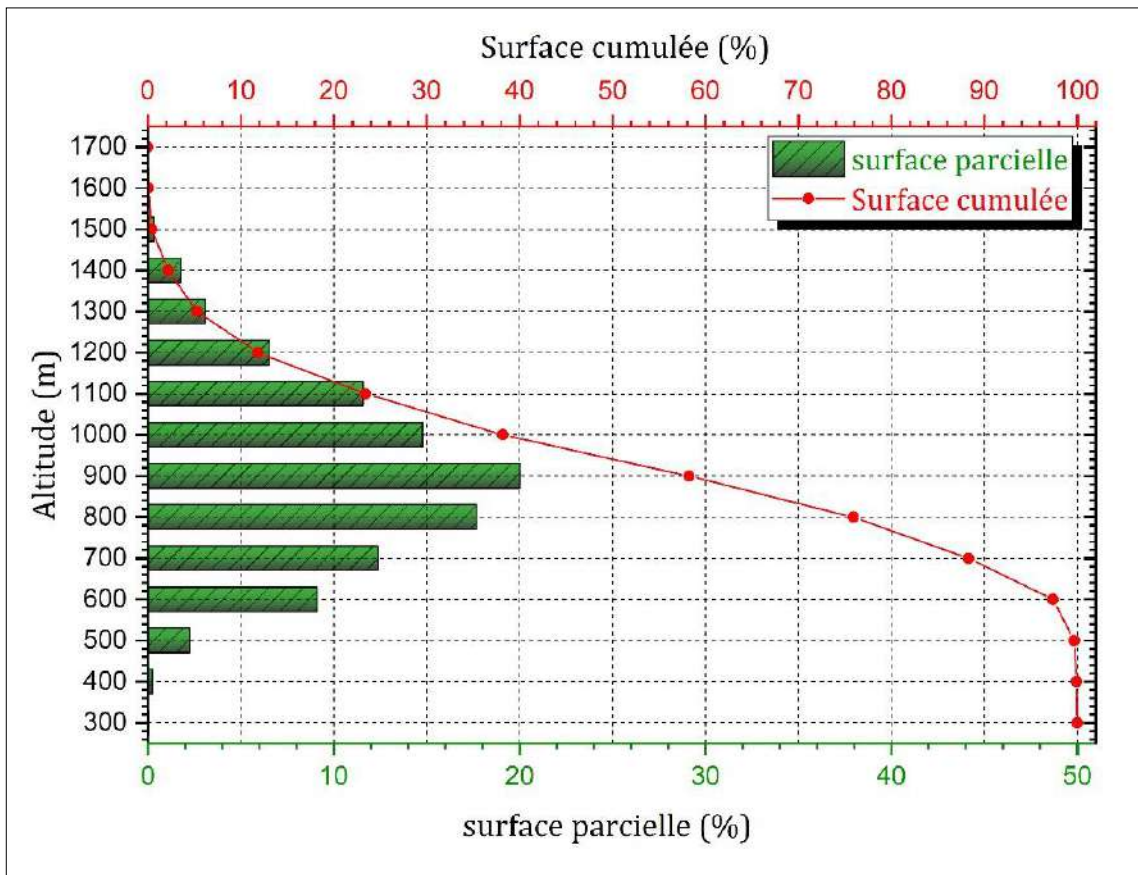


Figure 12 : Courbe hypsométrique du bassin Medjerda

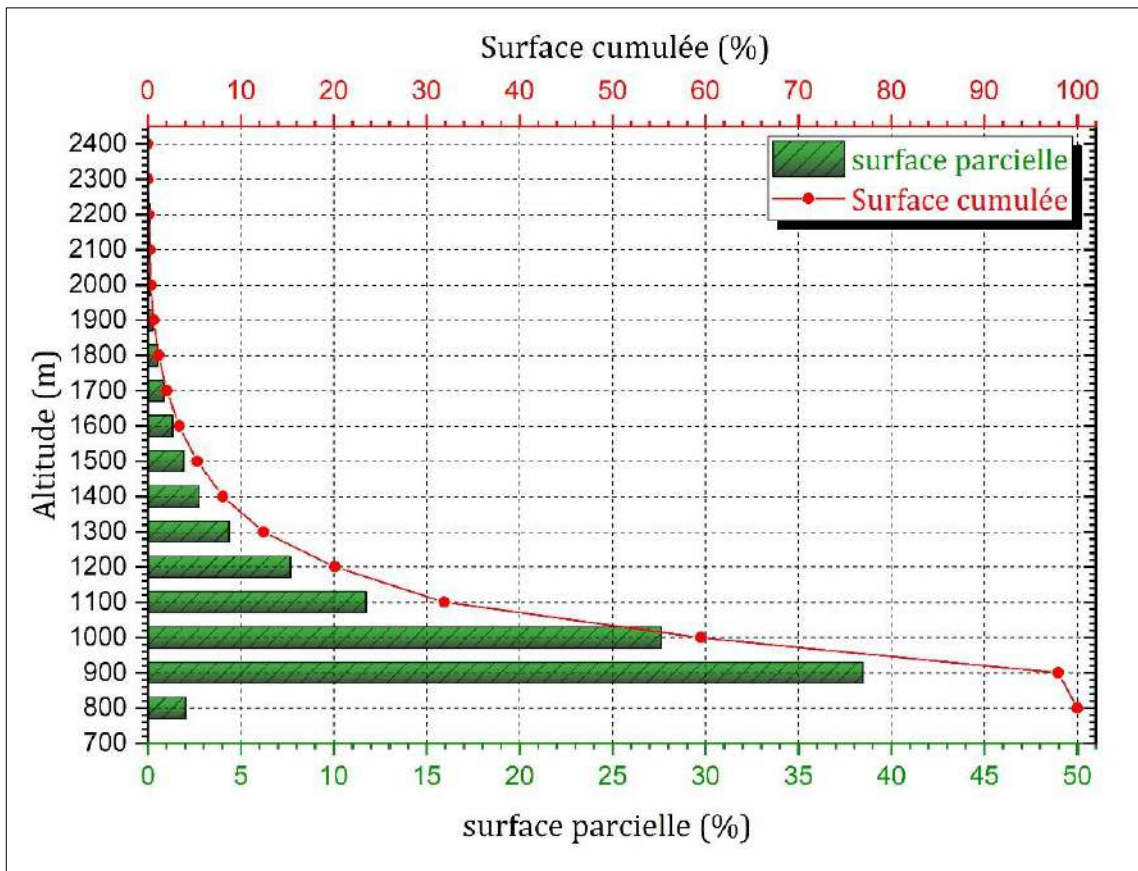


Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin Hauts Plateaux

### 3.2. Altitudes Caractéristiques

#### 3.2.1. Altitude maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus haut du bassin, tandis que l'altitude minimale représente le point le plus bas du bassin.

Ces deux paramètres déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et servent au calcul de la pente.

#### 3.2.2. Altitude moyenne

Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou encore par l'application de la formule suivant :

$$H_{moy} = \frac{\sum(hi. Ai)}{A}$$

Avec :

$H_{moy}$  : altitude moyenne du bassin (m)

$Ai$  : aire comprise entre deux courbes de niveau (Km<sup>2</sup>)

$hi$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

$A$  : superficie totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

#### 3.2.3. Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

#### 3.2.4. L'altitude H95%

L'altitude H<sub>95%</sub> correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

#### 3.2.5. L'altitude H5%

L'altitude H<sub>5%</sub> correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

Tableau 9: les altitudes Caractéristiques par sous bassin versant

Bassin	Code SBV	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Altitude minimale (m)	Altitude Maximale (m)	Altitude moyenne (m)	Altitude médiane	Altitude H <sub>95%</sub>	Altitude H <sub>5%</sub>
COTIER OUEST	301	379.54	97.79	0.00	1724.00	576.84	622.91	164.23	1334.99
	302	934.26	168.67	1.00	1999.00	865.09	960.18	424.07	1452.88
	303	561.34	149.25	0.00	1530.00	433.31	417.00	130.21	1169.58
	304	526.54	166.29	1.00	1994.00	424.09	869.27	181.24	1405.37
	305	357.54	105.71	2.00	1548.00	439.84	495.05	127.28	1210.05
			<b>551.84</b>		<b>0.80</b>	<b>1759.00</b>	<b>547.83</b>	<b>672.88</b>	
COTIER CENTRE	306	490.35	146.78	0.00	1161.00	394.92	478.04	143.70	906.22
	307	989.14	175.85	1.00	1360.00	324.61	387.12	147.22	838.76
	308	201.88	95.13	0.00	683.00	266.82	360.14	143.70	605.90

	309	1169.89	192.11	5.00	1211.00	347.58	383.60	137.25	963.70
	310	136.37	83.37	0.00	620.00	157.10	194.73	106.75	545.49
	311	1128.93	179.74	30.00	1204.00	298.72	366.59	130.21	805.33
	312	719.08	153.83	0.00	997.00	144.28	194.73	103.23	528.48
	313	507.11	123.44	15.00	930.00	123.08	174.20	113.79	464.54
	314	199.44	175.81	0.00	1003.00	331.39	349.58	116.72	764.86
		<b>615.80</b>		<b>5.67</b>	<b>1018.78</b>	<b>265.39</b>	<b>320.97</b>		
COTIER EST	315	862.65	209.06	12.00	1408.00	498.76	562.50	201.18	1092.16
	316	736.77	168.45	13.00	1191.00	290.45	349.58	120.24	818.82
	317	802.85	164.16	0.00	699.00	86.11	160.71	103.23	380.08
	318	438.45	132.95	0.00	563.00	118.38	181.24	96.78	441.08
			<b>710.18</b>		<b>6.25</b>	<b>965.25</b>	<b>248.43</b>	<b>313.51</b>	
KEBIR- RHUMEL	1001	1054.88	169.30	283.00	1660.00	890.79	973.67	629.95	1364.90
	1002	1116.36	175.50	178.00	1366.00	659.12	646.38	262.18	1088.64
	1003	1218.05	162.64	695.00	1281.00	903.16	994.20	842.28	1173.10
	1004	1162.84	200.76	558.00	1370.00	828.56	923.23	740.81	1156.09
	1005	1868.28	217.07	558.00	1722.00	853.78	946.69	737.88	1173.10
	1006	1082.04	170.20	178.00	1316.00	584.54	639.92	349.58	1156.09
	1007	1319.51	187.14	1.00	1455.00	453.26	491.53	147.22	1142.60
			<b>1260.28</b>		<b>350.14</b>	<b>1452.86</b>	<b>739.03</b>	<b>802.23</b>	
MEDJERDA	1201	1491.71	254.95	229.00	1350.00	779.48	899.77	589.48	1119.14
	1202	1831.00	248.23	661.00	1577.00	1015.49	1108.58	862.23	1418.86
	1203	1564.43	243.07	658.00	1626.00	936.29	997.13	818.82	1378.39
	1204	1487.69	235.49	460.00	1225.00	719.73	811.78	626.43	1034.67
	12 05	1368.31	264.81	424.00	1449.00	754.94	798.29	562.50	1237.03
			<b>1548.63</b>		<b>486.40</b>	<b>1445.40</b>	<b>841.19</b>	<b>923.11</b>	
SEYBOUSE	14 01	1735.17	231.70	741.00	1629.00	890.97	970.15	842.28	1156.09
	14 02	1197.66	199.67	255.00	1419.00	833.01	926.75	656.93	1203.01
	14 03	1106.69	180.64	242.00	1280.00	782.78	906.22	562.50	1112.10
	14 04	820.25	138.78	92.00	1401.00	470.43	495.05	255.15	1078.66
	14 05	553.10	149.73	96.00	1305.00	652.77	713.83	302.66	1220.02
	14 06	1062.18	180.68	0.00	972.00	177.74	214.67	113.79	619.39
			<b>1079.18</b>		<b>237.67</b>	<b>1334.33</b>	<b>634.62</b>	<b>704.45</b>	
HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	07 01	1603.79	242.82	897.00	1737.00	994.26	1065.17	926.75	1341.44
	07 02	1034.37	170.25	809.00	1654.00	946.49	1000.65	906.22	1324.43
	07 03	1554.65	255.29	792.00	2072.00	982.11	997.13	842.28	1503.33
	07 04	765.88	145.22	894.00	2305.00	1281.87	1310.21	1037.59	1870.55
	07 05	1244.34	202.26	826.00	1662.00	912.03	980.71	902.70	1183.07
	07 06	954.31	161.04	839.00	2318.00	1039.11	1045.15	907.12	1629.52
	07 07	2428.82	258.97	839.00	2169.00	977.31	1009.04	910.84	1406.86
			<b>1369.45</b>		<b>842.29</b>	<b>1988.14</b>	<b>1019.03</b>	<b>1058.29</b>	

Les résultats des altitudes Caractéristiques ( tableau 09), montrent que l'altitude des bassins de la régions d'étude, calculées à partir de la courbe hypsométrique, varie dans le bassin Côtiers constantinois entre 248.42 m (Côtiers constantinois Est) à 547.83 m (Côtiers constantinois Ouest).

Elle est de l'ordre de 634.61 m dans le bassin Seybouse et 739.02 m dans le bassin Kebir-Rhumel.

L'altitude moyenne dans le bassin Medjerda et le bassin des Hauts Plateaux varie dans de fortes proportions.

L'altitude moyenne des sous bassins, calculée à partir de leurs courbes hypsométriques respectives, varie dans de faibles proportions dans le bassin Côtiers constantinois de 86.11 m

(sous bassin oued mafragh 317 ) à 865.08 m (sous bassin oued agrioun 302). L'altitude moyenne varie de moins de 200 m (sous bassins oued seyhouse maritime 1406 ) à plus de 800 m (sous bassin oued cherf aval 1402 et oued cherf amont 1401). Dans le bassin Kebir-Rhumel, elle est variée entre 453.26 m ( sous bassin oued kebir mariti me 1007) à 903.15 m ( sous bassin oued rhumel amont 1003). Dans les sous bassin des Hauts Plateaux, elle est élevée, variant de 912.03 m ( sous bassin garaet annk djem 0705) à 1281.86 m ( sous bassin oued chemorah 0704). Dans le bassin Medjerda, elle varie de 719.72 m (sous bassin oued mellegue amont 1204) à 1015.48 m (sous bassin oued meskiana 1202).

### 3.3. Les indices des pentes

Les indicateurs de pente sont déterminés en fonction de la connaissance et la distribution hypsométrique dans le bassin versant. Sa détection peut se faire à l'aide de l'indice de pente global  $I_g$  défini par la relation :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

Avec :

D : dénivelée entre les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant tirées à partir de la courbe hypsométrique (m).

L : longueur du rectangle équivalent (m).

Tableau 10: Classification du relief selon  $I_g$  par L'ORSTOM

Type de relief	Indice de pente globale
Relief très faible	$I_g < 0.002$ m/Km
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$I_g > 0.5$ m/Km

### 3.4. Dénivelée spécifique

Contrairement à l'indice global  $I_g$ , la dénivelée spécifique  $D_s$  est indépendante de la surface et permet donc la comparaison des bassins de tailles différentes en fonction de leur relief.

Elle est calculée selon la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = \frac{D}{L} \times \sqrt{S}$$

Tableau 11: Classification du relief selon DS

Ds < 10	Relief très faible
10m < Ds < 25m	Relief faible
25m < Ds < 50m	Relief assez faible
50m < Ds < 100m	Relief modéré
100m < Ds < 250m	Relief assez fort
250m < Ds < 500m	Relief fort
Ds > 500m	Relief très fort

Les résultats du tableau 12, montrent d'après la classification de L'ORSTOM, que les valeurs de Ig ( $Ig > 0.5m/Km$ ) concernent les sous bassin de la région, ce qui permet de les ranger dans la classe de Relief très fort. Ce relief fort, est un élément déterminant de la réaction du bassin vis-à-vis les pluies.

Les valeurs les plus élevées de le dénivelée spécifique (Ds) concernent les sous-bassins situés à Côtiers Constantinois-East ( relief fort à très fort), tandis que les valeurs les plus faibles de le dénivelé spécifique (Ds), correspondent aux sous bassins situés à Medjerda et les hauts plateaux.

A noter également que l'ensemble des bassins appartiennent à la classe des reliefs assez forts.

Tableau 12: Valeurs de Ig et Ds par sous bassin versant

Bassin	Code SBV	Nom SOUS-BASSIN	Superficie (km <sup>2</sup> )	Ig	Ds	Classe de relief
COTIER OUEST	0301	Oued DJEMAA	379.54	29.85	581.55	Relief très fort
	0302	Oued AGRIOUN	934.26	14.45	441.60	Relief fort
	0303	COTIERS JIJEL	561.34	15.71	372.32	Relief fort
	0304	Oued DJENDJEN	526.54	16.06	368.43	Relief fort
	0305	Oued NIL	357.54	24.12	456.09	Relief fort
COTIER CENTRE	0306	COTIERS CAP BOUGAROUN	490.35	11.56	255.99	Relief fort
	0307	Oued GUEBLI	989.14	9.26	291.23	Relief fort
	0308	Oued BIBI	201.88	10.78	153.22	Relief assez fort
	0309	Oued SAF SAF	1169.89	10.11	345.82	Relief fort
	0310	COTIERS FILFILA	136.37	11.51	134.44	Relief assez fort
	0311	Oued KEBIR-HAMMAM	1128.93	9.03	303.38	Relief fort
	0312	Oued KEBIR-MAGROUN	719.08	6.44	172.73	Relief assez fort
	0313	LAC FETZARA	507.11	6.75	152.01	Relief assez fort
COTIER EST	0314	COTIERS HERBILLON	199.44	7.57	106.97	Relief assez fort
	0315	Oued BOU NAMOUSSA	862.65	9.33	274.02	Relief fort
	0316	Oued KEBIR EST	736.77	9.40	255.17	Relief fort
	0317	Oued MAFRAGH	802.85	3.91	110.91	Relief assez fort
KEBIR- RHUMEL	0318	COTIERS LA CALLE	438.45	5.83	122.09	Relief assez fort
	1001	Oued DEHAMECHA	1054.88	10.58	343.61	Relief fort
	1002	Oued KEBIR- ENDJA	1116.36	11.43	381.88	Relief fort
	1003	Oued RHUMEL AMONT	1218.05	5.38	187.68	Relief assez fort
	1004	Oued RHUMEL- SEGUI N	1162.84	4.77	162.75	Relief assez fort
	1005	Oued BOU MERZOUG	1868.28	5.00	216.03	Relief assez fort
	1006	Oued RHUMEL- SMENDOU	1082.04	11.60	381.50	Relief fort
MEDJERDA	1007	Oued KEBIR MARITI ME	1319.51	13.05	474.07	Relief fort
	1201	Oued MEDJERDA	1491.71	4.63	178.76	Relief assez fort
	1202	Oued MESKIANA	1831.00	5.20	222.60	Relief assez fort

	1203	Oued CHABRO	1564.43	5.23	207.04	Relief assez fort
	1204	Oued MELLEGUE AMONT	1487.69	3.95	152.36	Relief assez fort
	1205	Oued MELLEGUE AVAL	1368.31	5.57	206.02	Relief assez fort
SEYBOUSE	1401	Oued CHERF AMONT	1735.17	3.20	133.14	Relief assez fort
	1402	Oued CHERF AVAL	1197.66	6.36	220.03	Relief assez fort
	1403	Oued BOU HAMDANE	1106.69	7.26	241.53	Relief assez fort
	1404	Oued SEYBOUSE MOYENNE	820.25	15.17	434.51	Relief fort
	1405	Oued MELAH	553.10	13.78	324.19	Relief fort
	1406	Oued SEYBOUSE MARITI ME	1062.18	6.61	215.57	Relief assez fort
HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	0701	CHOTT BEIDA	1603.79	3.90	156.19	Relief assez fort
	0702	MERDJA ZANA	1034.37	5.94	190.95	Relief assez fort
	0703	SEBKHET EZ ZEMOUL	1554.65	5.80	228.62	Relief assez fort
	0704	Oued CHEMORAH	765.88	13.93	385.48	Relief fort
	0705	GARAET ANNK DJEM	1244.34	3.23	113.95	Relief assez fort
	0706	Oued BOULEFREIS	954.31	10.93	337.72	Relief fort
	0707	GARAET EL TARF	2428.82	4.65	229.04	Relief assez fort

#### 4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement.

Il peut prendre une multitude de forme en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent avoir une influence directe sur le degré de drainage du réseau hydrographique. Citons la nature et la structure géologique du substratum, la pente des terrains et les conditions climatiques de la région.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage, la fréquence des talwegs, le coefficient de torrentialité, le rapport de confluence, le rapport des longueurs et le temps de concentration.

##### 4.1. Extraction du réseau hydrographique et son hiérarchisation sur ArcGis

Le réseau hydrologique des sous-bassins a été réalisé sur la base d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) d'une résolution de 30 mètres, qui a permis de reproduire le chevelu hydrographique, avec ses ordres.

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation 3D d'un terrain ou d'une surface planétaire, créée à partir des données d'élévation du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets qui existent à la surface du sol, tels que les plantes et les bâtiments.

Les données altimétriques du Modèle Numérique de Terrain ont été utilisées afin de réaliser la carte des pentes, délimiter le bassin versant et déterminer le réseau hydrographique drainant le bassin versant.

Les sous-bassins versants ainsi que les réseaux hydrographiques ont été extraits à l'aide de l'outil ArcHydro dans ArcGIS 10,3 en suivant le modèle illustré à la figure 14.

Lorsque vous délimitez des bassins versants ou définissez des réseaux hydrographiques, vous parcourez une série d'étapes.

Au début du modèle, cette étude a utilisé l'outil de remplissage « fill » pour corriger le modèle d'altitude d'entrée, car le MNT contient des erreurs, généralement classées comme des



dépressions se nomment des cuvettes. Ensuite calculer le sens du flux et l'accumulation de flux de chaque emplacement de cellule. Après Le choix du seuil, lors de l'extraction du réseau conditionnent la qualité du réseau. Pour une même résolution du MNT, plus ce seuil est faible, plus le réseau hydrographique est dense.

Une fois les directions d'écoulement et les réseaux hydrographiques créés, vous pouvez utiliser d'autres outils d'analyse hydrologique pour déterminer les ordres hydrographiques et les propriétés des cours d'eau.

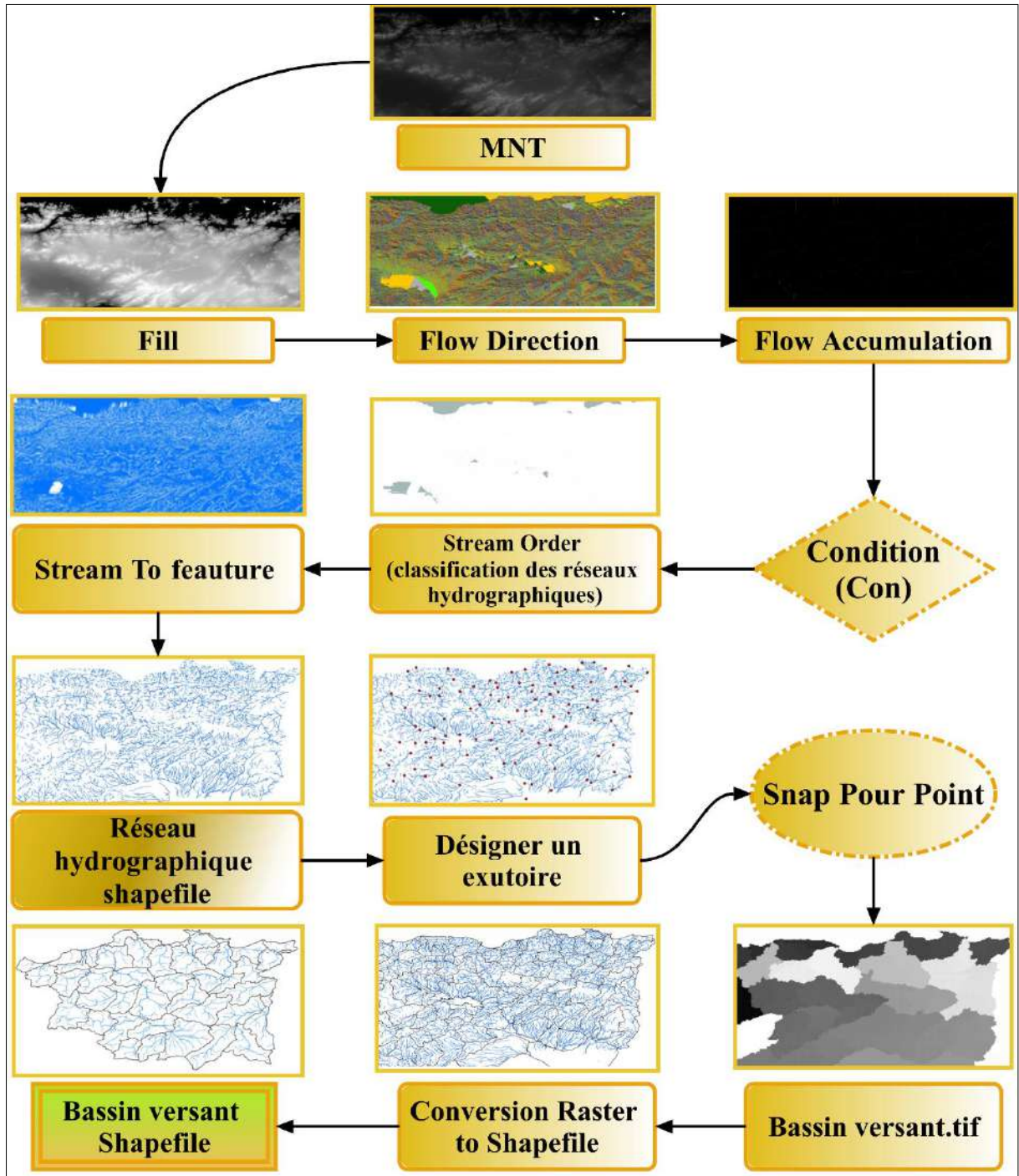


Figure 14 : Organigramme pour la délimitation et l'extraction des bassins versants

la délimitation d'un bassin versant topographique ne nécessite que d'un exutoire à partir duquel le géotraitement peut tracer des lignes de crêtes.

Le sous-bassin versant est ensuite calculé pour chaque point de contour à l'aide de l'outil « Watershed ». Ces sous-bassin versants sont convertis en polygones puis combinés avec la superficie du plan d'eau pour former le bassin versant total.

Pour chiffrer la subdivision du réseau, chaque cours d'eau est numéroté selon son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, varie d'un auteur à l'autre.

Dans ce modèle, les ordres de flux ont été attribués sur la base de la théorie proposée par Strahler (1964), Le système de classification de Strahler désigne un segment sans affluents comme un flux de premier ordre. Lorsque deux segments de flux de premier ordre se rejoignent, ils forment un segment de flux de second ordre et ainsi de suite.

## 4.2. Caractéristiques du réseau hydrographique

### 4.3. Description du réseau hydrographique

Le découpage de la région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) se fait comme suit (figure 15) :

**Le bassin versant de la Seybouse** porte le numéro 14 selon la nomenclature adoptée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et est subdivisé en six sous bassins versants, Il couvre une superficie de 6475.05 km<sup>2</sup> soit 14.79 % de la surface. Ce bassin versant comprend trois grands oueds : Cherf, Bouhamdane et Seybouse.

**Le bassin versant de la Medjerda** situé au Sud-Est de la région, il porte le numéro 12 selon la nomenclature adoptée par l'ANRH et est subdivisé en cinq sous bassins versants qui occupent une superficie de 7743.14 km<sup>2</sup> soit 17.69 % de la surface totale. Ce bassin versant comprend quatre grands oueds : Medjerda, Chabro, Meskiana et Mellegue.

**Le bassin versant du Kebir-Rhumel** s'étend sur une superficie de 8821.96 km<sup>2</sup> soit 20.16% de la surface, il est subdivisé en sept sous bassins versants et porte le numéro 10 selon la nomenclature adoptée par l'ANRH. Ce bassin versant comprend trois grands oueds : Boumerzoug, Rhumel-Enja et Kebir.

**Le bassin versant des Hauts Plateaux** occupe la partie Sud sur une superficie estimée à plus de 9586.17 km<sup>2</sup> ce qui représente 21.90 % de la surface totale, il est drainé par deux oueds : Chemora et Boulefreis, Ce bassin versant porte le numéro 07 selon la nomenclature adoptée par l'ANRH et est subdivisé en sept sous bassins versants.

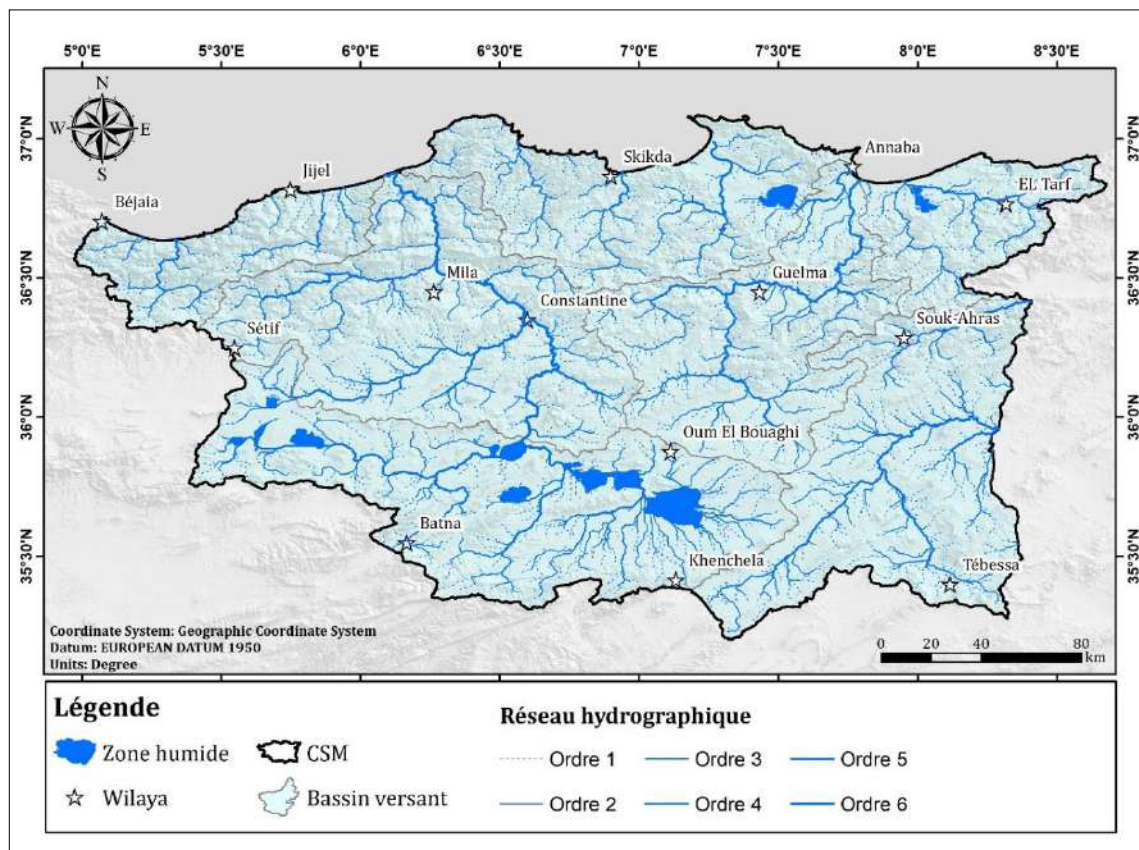


Figure 15 : Carte des Réseau hydrographique

Le bassin versant des Côtiers constantinois est situé au Nord de la région. Il couvre une superficie de 11142.12 km<sup>2</sup> soit 25.46 % de la surface totale, et est subdivisé en dix-huit sous bassins versant. Parmi eux, cinq sont situés au niveau du Côtiers constantinois Est, neuf appartiennent à celui du Centre et la partie Ouest rassemble les quatre sous bassins restants. Le bassin versant des Côtiers constantinois porte le numéro 03 selon la nomenclature adoptée par l’ANRH et comprend six grands oueds : Djendjen, Guebli, Safsaf, Bounamoussa, Kebir et Mafragh.

Les longueurs des Oueds permanents et temporaires par bassin sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 13:Longueur des oueds permanents et temporaires par sous-bassin versant

Bassin	Code sous	Nom SOUS-BASSIN	Longueur des oueds permanents Lp (km)	Longueur des oueds temporaires Lt (km)	Longueur total L (km)
COTIER OUEST	301	OUED DJEMAA	65,73	350,78	416,51
	302	OUED AGRIOUN	146,68	673,83	820,51
	303	COTIERS JIJEL	99,83	439,45	539,27
	304	OUED DJENDJEN	104,52	492,06	596,59
	305	OUED NIL	71,56	285,75	357,31
COTIER CENTRE	306	COTIERS CAP BOUGAROUN	40,14	355,77	395,91
	307	OUED GUEBLI	178,10	700,54	878,63
	308	OUED BIBI	35,82	156,46	192,29

	309	OUED SAF SAF	219,21	946,30	1165,51
	310	COTIERS FILFILA	6,68	89,21	95,89
	311	OUED KEBIR-HAMMAM	256,49	1050,35	1306,83
	312	OUED KEBIR-MAGROUN	183,97	717,44	901,41
	313	LAC FETZARA	56,80	351,93	408,73
	314	COTIERS HERBILLON	24,83	221,50	246,33
<b>COTIER EST</b>	315	OUED BOU NAMOUSSA	139,07	570,02	709,09
	316	OUED KEBIR EST	146,92	530,65	677,57
	317	OUED MAFRAGH	113,35	301,52	414,87
	318	COTIERS LA CALLE	33,07	192,82	225,89
<b>KEBIR-RHUMEL</b>	1001	OUED DEHAMECHA	162,56	680,54	843,10
	1002	OUED KEBIR- ENDJA	156,19	767,21	923,41
	1003	OUED RHUMEL AMONT	115,97	756,67	872,63
	1004	OUED RHUMEL- SEGUI N	156,58	801,56	958,14
	1005	OUED BOU MERZOUG	199,81	1297,49	1497,30
	1006	OUED RHUMEL- SMENDOU	179,00	809,60	988,61
	1007	OUED KEBIR MARITI ME	242,53	977,37	1219,90
<b>MEDJERDA</b>	1201	OUED MEDJERDA	154,85	555,04	709,89
	1202	OUED MESKIANA	220,35	1054,23	1274,57
	1203	OUED CHABRO	119,59	689,82	809,42
	1204	OUED MELLEGUE AMONT	116,71	550,61	667,32
	12 05	OUED MELLEGUE AVAL	103,91	539,13	643,04
<b>SEYBOUSE</b>	14 01	OUED CHERF AMONT	243,13	1211,36	1454,49
	14 02	OUED CHERF AVAL	190,38	904,48	1094,87
	14 03	OUED BOU HAMDANE	158,28	895,22	1053,49
	14 04	OUED SEYBOUSE MOYENNE	177,20	723,44	900,63
	14 05	OUED MELAH	85,65	344,66	430,31
	14 06	OUED SEYBOUSE MARITIME	235,59	716,19	951,78
<b>HAUTS PLATEAUX CONSTANTIOIS</b>	07 01	CHOTT BEIDA	49,05	786,54	835,59
	07 02	MERDJA ZANA	43,95	527,07	571,02
	07 03	SEBKHET EZ ZEMOUL	88,41	987,54	1075,95
	07 04	OUED CHEMORAH	126,12	649,17	775,29
	07 05	GARAET ANNK DJEM	102,48	681,23	783,72
	07 06	OUED BOULEFREIS	169,98	630,31	800,29
	07 07	GARAET EL TARF	185,07	1220,64	1405,71

### a. Densité de drainage

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant. Il correspond au rapport entre la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin :

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A}$$

Avec :

$D_d$  : Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>)

$\Sigma L$  : Somme des Longueurs de tous les cours d'eau (Km)

$A$  : Surface du bassin drainé (Km<sup>2</sup>)

$D_{dp}$  : Densité de drainage permanent (Km/Km<sup>2</sup>)

$D_{dt}$  : Densité de drainage temporaire (Km/Km<sup>2</sup>)

La densité de drainage dépend de la géologie, des caractéristiques morphométriques du bassin versant, ainsi que des conditions climatologiques et anthropiques.

Les valeurs des densités de drainage obtenues sont de 0.52, 0.69, 0.83, 0.91 et 0.92 Km/Km<sup>2</sup> pour les bassins versants medjerda, hauts plateaux constantinois, kebir- rhumel, seybose et côtiers constantinois respectivement.

Les valeurs de  $D_{dp}$  (densité de drainage permanent) et  $D_{dt}$  (densité de drainage temporaire) varient d'un bassin à l'autre, et les valeurs les plus faibles de  $D_{dp}$  correspondent aux valeurs les plus fortes de  $D_{dt}$ .

La densité de drainage permanent est très faible dans le bassin des hauts plateaux constantinois, elle est de 5.87 % au chott beida, par contre elle est élevée dans le bassin des côtiers constantinois (sous bassin d'oued mafragh 27.32 %) et dans le bassin seybose (sous bassin d'oued seybose maritime 24.75 %).

D'après ces résultats, on peut déduire que les bassins versants sont en général assez bien drainés,

Les valeurs des densités de drainage par bassin sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 14: Caractéristiques du réseau hydrographique par sous-bassin versant

Bassin	Code sous	Nom SOUS-BASSIN	Ddp	Ddt	Dd	Ddp/Dd	Ddt/Dd
<b>COTIER OUEST</b>	301	Oued DJEMAA	0.17	0.92	1.10	15.78	84.22
	302	Oued AGRIOUN	0.16	0.72	0.88	17.88	82.12
	303	COTIERS JIJEL	0.18	0.78	0.96	18.51	81.49
	304	Oued DJENDJEN	0.20	0.93	1.13	17.52	82.48
	305	Oued NIL	0.20	0.80	1.00	20.03	79.97
<b>COTIER CENTRE</b>	306	COTIERS CAP BOUGAROUN	0.08	0.73	0.81	10.14	89.86

	307	OUED GUEBLI	0.18	0.71	0.89	20.27	79.73
	308	OUED BIBI	0.18	0.78	0.95	18.63	81.37
	309	OUED SAF SAF	0.19	0.81	1.00	18.81	81.19
	310	COTIERS FILFILA	0.05	0.65	0.70	6.97	93.03
	311	OUED KEBIR-HAMMAM	0.23	0.93	1.16	19.63	80.37
	312	OUED KEBIR-MAGROUN	0.26	1.00	1.25	20.41	79.59
	313	LAC FETZARA	0.11	0.69	0.81	13.90	86.10
	314	COTIERS HERBILLON	0.12	1.11	1.24	10.08	89.92
<b>COTIER EST</b>	315	OUED BOU NAMOUSSA	0.16	0.66	0.82	19.61	80.39
	316	OUED KEBIR EST	0.20	0.72	0.92	21.68	78.32
	317	OUED MAFRAGH	0.14	0.38	0.52	27.32	72.68
	318	COTIERS LA CALLE	0.08	0.44	0.52	14.64	85.36
<b>KEBIR- RHUMEL</b>	1001	OUED DEHAMECHA	0.15	0.65	0.80	19.28	80.72
	1002	OUED KEBIR- ENDJA	0.14	0.69	0.83	16.91	83.09
	1003	OUED RHUMEL AMONT	0.10	0.62	0.72	13.29	86.71
	1004	OUED RHUMEL- SEGUIN	0.13	0.69	0.82	16.34	83.66
	1005	OUED BOU MERZOUG	0.11	0.69	0.80	13.34	86.66
	1006	OUED RHUMEL- SMENDOU	0.17	0.75	0.91	18.11	81.89
	1007	OUED KEBIR MARITI ME	0.18	0.74	0.92	19.88	80.12
<b>MEDJERDA</b>	1201	OUED MEDJERDA	0.10	0.37	0.48	21.81	78.19
	1202	OUED MESKIANA	0.12	0.58	0.70	17.29	82.71
	1203	OUED CHABRO	0.08	0.44	0.52	14.78	85.22
	1204	OUED MELLEGUE AMONT	0.08	0.37	0.45	17.49	82.51
	12 05	OUED MELLEGUE AVAL	0.08	0.39	0.47	16.16	83.84
<b>SEYBOUSE</b>	14 01	OUED CHERF AMONT	0.14	0.70	0.84	16.72	83.28
	14 02	OUED CHERF AVAL	0.16	0.76	0.91	17.39	82.61
	14 03	OUED BOU HAMDANE	0.14	0.81	0.95	15.02	84.98
	14 04	OUED SEYBOUSE MOYENNE	0.22	0.88	1.10	19.67	80.33
	14 05	OUED MELAH	0.15	0.62	0.78	19.90	80.10
	14 06	OUED SEYBOUSE MARITIME	0.22	0.67	0.90	24.75	75.25
<b>HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS</b>	07 01	CHOTT BEIDA	0.03	0.49	0.52	5.87	94.13
	07 02	MERDJIA ZANA	0.04	0.51	0.55	7.70	92.30
	07 03	SEBKHET EZ ZEMOUL	0.06	0.64	0.69	8.22	91.78
	07 04	OUED CHEMORAH	0.16	0.85	1.01	16.27	83.73
	07 05	GARAET ANNK DJEM	0.08	0.55	0.63	13.08	86.92

	07 06	OUED BOULEFREIS	0.18	0.66	0.84	21.24	78.76
	07 07	GARAET EL TARF	0.08	0.50	0.58	13.17	86.83

**b. Fréquence des talwegs**

La fréquence des talwegs, définie par Horton (1945), est le rapport entre le nombre des oueds et l'aire du bassin versant.

$$F = \frac{\Sigma N}{A}$$

Avec :

F : Fréquence des thalwegs (Km<sup>-2</sup>)

N : Nombre des cours d'eau

A : Surface du bassin versant

Les valeurs les plus forte de la fréquence des talwegs concernent les sous bassins situés à Côtiers constantinois-Centre, et les valeurs les plus faible de la fréquence des talwegs, correspondent au sous bassins situés dans la Medjerda.

**c. Coefficient de torrentialité**

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence des thalwegs. Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage.

$$C_T = D_d \cdot F$$

Avec :

D<sub>d</sub> : Densité de drainage

F : Fréquence des thalwegs

Selon la classification de smith (1950) reporté dans le tableau 15 , le coefficient de torrentialité de la région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) est inférieur à 4, ce qui correspond à une texture de drainage grossière.

Tableau 15: Classification de la texture (selon smith 1950)

Type de texture	Valeurs de C <sub>T</sub>
Grossière	< 4
Intermédiaire	4 à 10
Fine	10 à 15
Ultra fine	>15

**d. Rapport de confluence**

C'est le rapport de nombre des cours d'eau d'ordre N, par celle des cours d'eau d'ordre N+1, il se définit par la formule suivante :

$$R_C = \frac{N_n}{N_{(n+1)}}$$

La moyenne du rapport de confluence calculé pour la région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) est égale à 3, ce qui indique que les sous-bassins sont bien hiérarchisés.

#### e. Rapport des longueurs

C'est le rapport de longueur des cours d'eau d'ordre N+1, par celle des cours d'eau d'ordre N. Il est défini par la formule suivante :

$$R_L = \frac{L_{(N+1)}}{L_N}$$

Les rapports de longueur des sous bassins varient entre 0.25 dans le bassin des Côtiers constantinois à 5.45 dans le bassin seybouse.

#### f. Temps de concentration

Le temps de concentration est le temps qu'il faut à une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour atteindre l'exutoire. Il est calculé selon la formule de GIONDOTTI

$$T = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} + H_{min}}}$$

Avec :

T : temps de concentration (heure)

A : superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

L : longueur du talweg principal (km)

Hmoy : altitude moyenne (m)

Hmin : altitude minimale (m)

Les temps de concentration présentés par les sous bassins versant varient ainsi de 2 h à 22 h.

Tableau 16: Densité de drainage par sous-bassin versant

Nom SOUS-BASSIN	Superficie (km <sup>2</sup> )	F	Dd	Ct	T
Oued DJEMAA	379.54	0.55	1.10	0.61	5.85
Oued AGRIOUN	934.26	0.31	0.88	0.27	7.37
COTIERS IJEL	561.34	0.46	0.96	0.44	8.09
Oued DJENDJEN	526.54	0.49	1.13	0.56	9.09
Oued NIL	357.54	0.41	1.00	0.41	4.85
COTIERS CAP BOUGAROUN	490.35	0.35	0.81	0.28	6.93
Oued GUEBLI	989.14	0.37	0.89	0.33	9.25
Oued BIBI	201.88	0.51	0.95	0.48	4.40
Oued SAF SAF	1169.89	0.48	1.00	0.48	15.00
COTIERS FILFILA	136.37	0.33	0.70	0.23	5.68
Oued KEBIR-HAMMAM	1128.93	0.61	1.16	0.70	9.66
Oued KEBIR-MAGROUN	719.08	0.72	1.25	0.90	17.93
LAC FETZARA	507.11	0.43	0.81	0.34	11.34
COTIERS HERBILLON	199.44	1.05	1.24	1.29	4.46
Oued BOU NAMOUSSA	862.65	0.32	0.82	0.26	10.55



Oued KEBIR EST	736.77	0.36	0.92	0.33	8.67
Oued MAFRAGH	802.85	0.17	0.52	0.09	19.82
COTIERS LA CALLE	438.45	0.18	0.52	0.09	11.99
Oued DEHAMECHA	1054.88	0.24	0.80	0.19	7.28
Oued KEBIR- ENDJA	1116.36	0.25	0.83	0.21	8.17
Oued RHUMEL AMONT	1218.05	0.17	0.72	0.13	5.16
Oued RHUMEL- SEGUI N	1162.84	0.24	0.82	0.19	7.23
Oued BOU MERZOUG	1868.28	0.26	0.80	0.21	5.84
Oued RHUMEL- SMENDOU	1082.04	0.35	0.91	0.32	9.78
Oued KEBIR MARITI ME	1319.51	0.35	0.92	0.32	13.68
Oued MEDJERDA	1491.71	0.10	0.48	0.05	9.69
Oued MESKIANA	1831	0.18	0.70	0.12	7.84
Oued CHABRO	1564.43	0.10	0.52	0.05	4.94
Oued MELLEQUE AMONT	1487.69	0.07	0.45	0.03	8.51
Oued MELLEQUE AVAL	1368.31	0.10	0.47	0.05	6.09
Oued CHERF AMONT	1735.17	0.24	0.84	0.20	6.30
Oued CHERF AVAL	1197.66	0.30	0.91	0.27	9.20
Oued BOU HAMDANE	1106.69	0.33	0.95	0.31	5.28
Oued SEYBOUSE MOYENNE	820.25	0.45	1.10	0.49	10.35
Oued MELAH	553.1	0.29	0.78	0.23	4.96
Oued SEYBOUSE MARITIME	1062.18	0.34	0.90	0.31	22.73
CHOTT BEIDA	1603.79	0.16	0.52	0.08	4.71
MERDJA ZANA	1034.37	0.18	0.55	0.10	4.01
SEBKHET EZ ZEMOUL	1554.65	0.27	0.69	0.19	6.43
Oued CHEMORAH	765.88	0.31	1.01	0.31	4.30
GARAET ANNK DJEM	1244.34	0.23	0.63	0.15	5.04
Oued BOULEFREIS	954.31	0.23	0.84	0.20	3.67
GARAET EL TARF	2428.82	0.17	0.58	0.10	6.04

## 5. Conclusion

La région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) couvre une superficie de 43768,44 km<sup>2</sup>. Les résultats des caractéristiques morphométriques montrent que les sous bassins présentent une forme allongée. Dans l'ensemble l'indice de compacité de Gravelius varie entre 1,3 à oued rhumel amont et 3,4 à cotiers herbillon.

L'hypsométrie du bassin, montre que l'altitude maximale est de 2318 m, tandis que l'altitude moyenne est de 1019 m.

L'indice de pente global ( $I_g > 0,5\text{m/Km}$ ) et la dénivelé spécifique désignent un bassin à relief fort. Selon la classification de STRAHLER adoptée pour notre bassin versant, l'ordre le plus élevé des cours d'eau du bassin est l'ordre 6, et la longueur totale du chevelou est de 33 889,64 km, avec un réseau de 5706,11 km d'oueds permanents et 28183,5 km d'oueds temporaires.

La densité de drainage du bassin égale à 0,82 km/km<sup>2</sup>, ce qui indique une infiltration importante, et le temps de concentration est compris entre 2 h à 22 h.

# Partie II

## Étude de la sécheresse et de ses impacts sur l'agriculture

Chapitre 03 : Caractéristiques climatiques et leurs impacts

Chapitre 04 : Analyse et cartographie des précipitations

Chapitre 05 : Analyse et cartographie des indices de sécheresse

Chapitre 06 : Surveillance spatio-temporelle et détection des zones vulnérables à la sécheresse



# **Chapitre III**

## *Caractéristiques climatiques et leurs impacts*



## Chapitre III: Caractéristiques climatiques et leurs impacts

### 1. Introduction

L'étude des données climatologiques joue un rôle important dans la compréhension du comportement hydrologique des cours d'eau, de la variabilité des ressources, et dans la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. Afin de mieux comprendre le fonctionnement et l'impact du système hydraulique sur la zone d'étude, il est donc nécessaire de déterminer le bilan hydrique. Les deux facteurs climatiques de première importance qui déterminent le climat sont la pluviométrie et la température.

Pour étudier les caractéristiques climatiques de la région d'étude, les données climatiques de 27 stations de précipitations de la période 1981-2021 ont été utilisées, dont les coordonnées géographiques sont indiquées dans le tableau suivant (Tableau 17). Sur un cycle de quarante ans (1981/1982 – 2020/2021), nous examinons la variation des précipitations et des températures observées aux stations concernées.

Tableau 17 : Les coordonnées des stations météorologiques

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude
<b><u>Côtiers constantinois</u></b>			
Ain Assel	36.77	8.36	31.97
Amoucha	36.43	5.42	679.84
Cheffia	36.61	8.04	159.15
Ramdane Djamale	36.74	6.9	38.77
Taher	36.77	5.9	49.58
Zitouna	36.99	6.46	553.54
<b><u>Seybouse</u></b>			
Ain Berda	36.66	7.61	129.25
Berriche	35.91	7.37	900.14
Bordj Sabat	36.42	7.03	534.61
Guelma	36.47	7.47	196.11
Ksar Sbahi	36.08	7.26	834.00
Sedrata	36.13	7.53	811.48
<b><u>Medjerda</u></b>			
Ain Dhala	35.45	7.56	980.68
Bou Khadra	35.75	8.03	848.64
M'Daourouch	36.07	7.84	840.79
Ouenza	35.95	8.14	566.77
Souk Ahras	36.28	7.97	655.15
Tebessa	35.42	8.12	824.00
<b><u>Kebir-Rhumel</u></b>			
Ain Fakroun	35.98	6.88	926.40
Bir Drimil	36.04	6.42	851.27
Chelghoum Laid	36.16	6.16	763.88
Constantine- ONM	36.28	6.62	696.72
Djemila	36.32	5.73	914.14
El Milia	36.76	6.28	143.76
<b><u>Hauts Plateaux</u></b>			
Batna	35.56	6.17	1030.10
Foum el Gueiss	35.47	6.94	961.00
Foum Toub	35.41	6.55	1159.34

## 2. Les facteurs climatiques

### 2.1. Précipitation moyenne annuelles

A partir de la figure (16), on remarque l'irrégularité de la distribution des pluies sur les 40 ans étudiés pour chaque bassin versant.

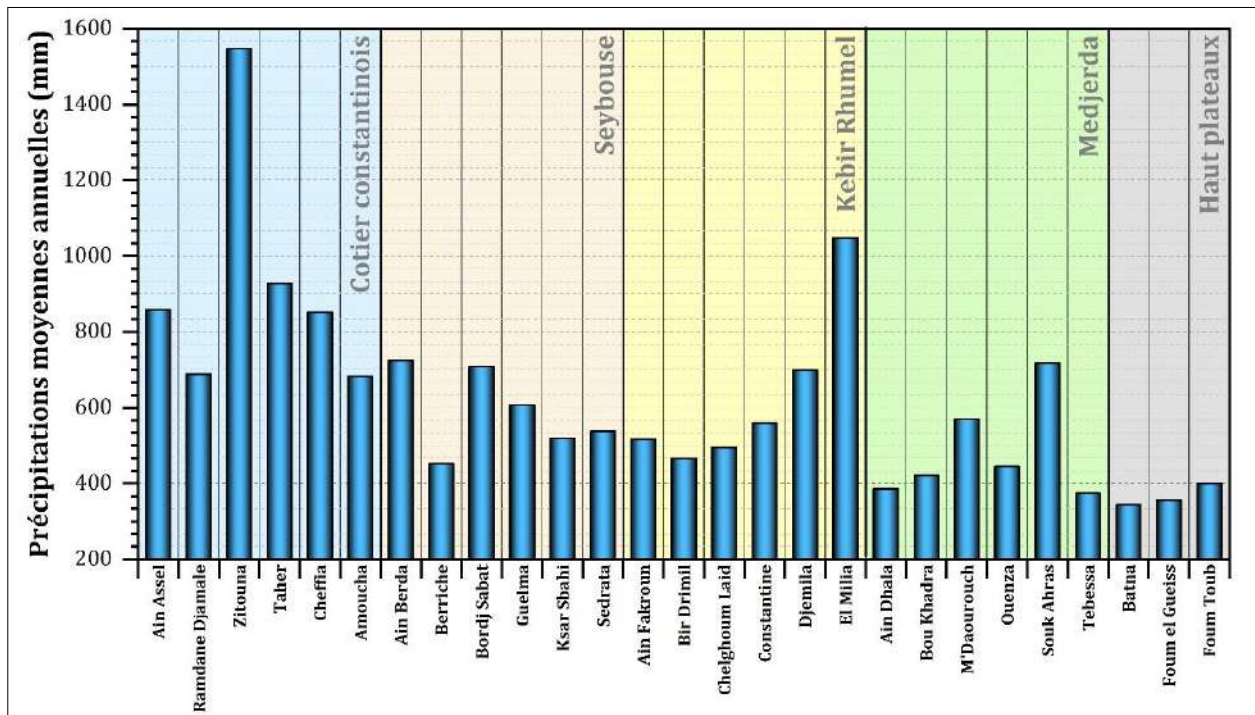


Figure 16 : Histogramme des précipitations moyenne annuelles de 1981 à 2021

Les stations du bassin de la Cotier Constantinois enregistrent les pluies les plus élevées de la région, avec des valeurs qui atteignent les 1546.78 mm comme valeurs maximales (Zitouna), localisées aux niveaux du bassin des Cotiers Constantinois Centre.

Les précipitations moyenne annuelles du bassin de la Seybouse varient entre 451.28 mm et 724.34 mm.

Le bassin de la Kebir Rhumel enregistre rarement des valeurs qui dépassent les 600 mm comme hauteur moyenne annuelle, cette dernière varie entre 450 et 550 mm dans la région. Les valeurs maximales sont localisées au niveau des stations (Djemila et El Milia) avec des hauteurs qui dépassent les 700 mm.

Les précipitations moyenne annuelles du bassin de la Medjerda varient entre 374.74 mm à Tebessa et 716.86 mm à Souk Ahras.

Les valeurs des précipitations annuelles moyennes dans les trois stations du bassin des Haut plateaux sont de l'ordre de 399.8 mm pour la station de Foum Toub, 355.94 mm pour celle de Foum el Gueiss et 343.08 mm à Batna.

Selon (Seltzer, 1946), La répartition des précipitations en Algérie est régie par les trois lois suivantes :

- Les précipitations augmentent avec l'altitude
- Elle augmente également d'Ouest en Est et du Sud au Nord.
- La quantité de précipitations diminue à mesure qu'on s'éloigne de la côte.

### 2.2. Précipitations moyennes mensuelles

L'analyse de la moyenne mensuelle des précipitations aux 27 stations pluviométriques pour la période 1981-2021, montre que les précipitations mensuelles sont très irrégulièrement réparties à l'échelle annuelle.

Tableau 18 : Précipitation moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Côtiers constantinois »

Bassin Versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Côtiers Constantinois E	Ain Assel	46.1	76.6	119.7	143.6	141.5	109.7	80.1	61.3	46.6	18.4	3.54	10.7
	Ramdane Djamaie	33.62	62.64	86.36	107.54	118.92	86.22	71.94	51.30	44.58	13.90	3.38	8.18
	Zitouna	65.86	127.08	216.94	277.62	278.18	195.84	143.28	102.66	83.42	29.18	4.44	22.28
	Taher	45.02	90.74	129.90	159.80	144.16	108.30	93.80	71.32	49.90	20.44	3.44	10.32
	Cheffia	41.70	70.60	101.10	141.50	145.32	113.26	88.38	65.62	53.50	18.38	3.50	8.70
	Amoucha	41.30	48.12	85.74	100.76	113.64	79.04	65.64	57.14	49.10	21.46	6.06	14.72
Moyenne mensuelle		45,2	75.5	111.8	144.0	145.2	113.6	85.9	65.1	50.0	18.3	3.88	9.73

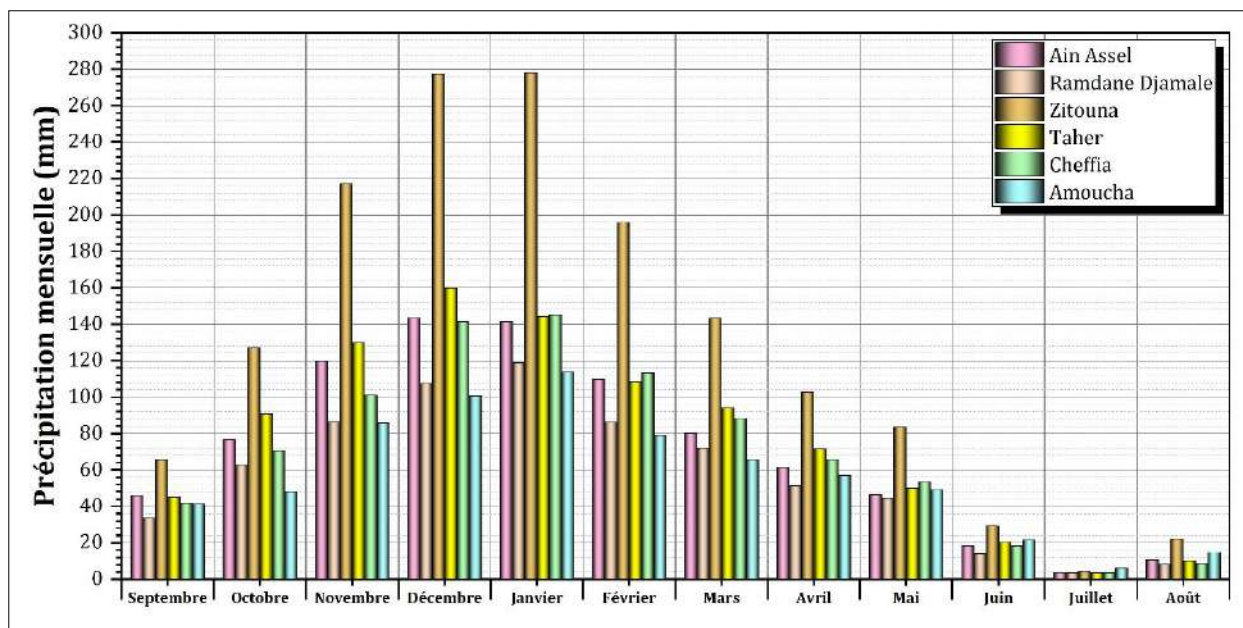


Figure 17 : Histogramme des précipitations moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin des Côtiers constantinois

Les histogrammes de la Figure. 17 représentent la répartition des précipitations moyennes mensuelles des stations Ain Assel, Ramdane Djamaie, Zitouna, Taher, Cheffia et Amoucha relative à la période 1981-2021. L'observation de ces histogrammes, montre que le mois le plus pluvieux de l'année et le mois de Janvier avec une moyenne mensuelle de 278.18 mm à Zitouna, 145.32 mm à Cheffia et 118.92 mm à Ramdane Djamaie et 113.64 mm à Amoucha, Pour la station

de Ain Assel, son maximum atteint 119.7 mm au mois de Novembre, et pour la station de Taher, son maximum atteint 159.80 mm au mois de décembre.

Tandis que le mois de Juillet étant le mois le plus sec avec une moyenne mensuelle de 6.06 mm à Amoucha, 4.44 mm à Zitouna, 3.50 mm à Cheffia et à Ain Assel, 3.44 mm à Taher et 3.38 mm à Ramdane Djamale.

Tableau 19 : Précipitation moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Seybouse »

Bassin versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Seybouse	Ain Berda	37.1	65.3	91.4	124.7	123.8	89.5	68.0	50.3	42.6	16.6	3.5	11.4
	Berriche	36.7	36.4	45.3	46.2	53.1	50.8	51.7	39.4	49.8	17.7	10.9	13.3
	Bordj Sabat	36.8	55.1	73.9	111.9	121.5	87.5	71.4	55.5	57.8	21.7	3.5	11.4
	Guelma	30.5	49.5	67.2	92.7	97.1	73.3	64.6	50.0	48.2	18.5	3.5	11.4
	Ksar Sbahi	34.4	40.0	52.0	64.7	76.9	61.0	57.4	42.8	51.7	20.2	7.1	11.3
	Sedrata	35.7	41.32	56.24	70.96	80.38	62.9	58.48	45.86	48	17.6	8.14	11.18
Moyenne mensuelle		35,4	48.7	65.7	87.0	93.6	72.0	62.8	47.9	49.6	18.7	6.0	11.6

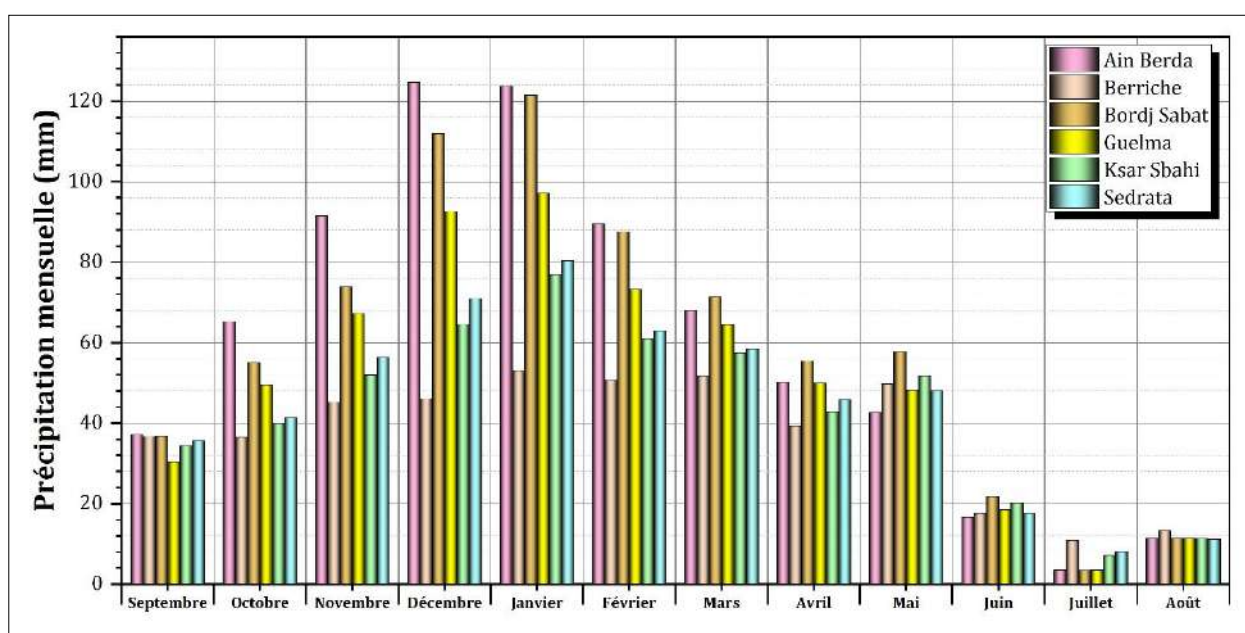


Figure 18 : Histogramme des précipitations moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin de la Seybouse

Les résultats des précipitations mensuelles montrent que le mois le plus pluvieux est Janvier dans les cinq stations. Les hauteurs sont de l'ordre de 121.5 mm pour la station de Bordj Sabat, 97.1 mm pour la station de Guelma, 80.38 mm pour la station de Sedrata, 76.9 mm pour la station Ksar Sbahi, 53.1 mm pour la station de Berriche. Pour la station de Ain Berda son maximum atteint 124.7 mm au mois de Décembre, par contre le mois de Juillet est le mois le moins pluvieux, où l'on enregistre des précipitations très faibles qui varient de 10.9 mm pour la station de Berriche,

8.14 mm pour la station de Sedrata, 7.1 mm pour la station de Ksar Sbahi et 3.5 mm pour la station de Ain Berda, Bordj Sabat et Guelma (figure 18).

Tableau 20 : Précipitation moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Kebir-Rhumel »

Bassin versant	Station pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Kebir-Rhumel	Ain Fakroun	36.0	40.0	54.0	48.5	65.6	55.1	62.4	47.3	55.4	27.2	9.7	15.8
	Bir Drimil	32.8	34.1	56.9	50.5	54.5	46.0	51.7	41.0	49.1	26.3	8.9	14.6
	Chelghoum Laid	30.8	36.8	57.6	62.4	71.3	56.4	51.7	41.6	47.8	21.9	6.1	10.2
	Constantine	35.1	46.5	64.6	78.1	78.3	63.0	62.2	51.2	45.1	18.1	5.1	11.4
	Djemila	44.6	46.2	83.3	103.2	112.8	86.4	66.0	59.6	52.2	23.1	6.1	15.8
	El Milia	47.4	88.0	132.9	188.0	194.1	135.5	93.6	74.0	58.4	22.7	4.3	8.2
Moyenne mensuelle		37.8	48.6	74.9	88.4	96.1	73.7	64.6	52.5	51.3	23.2	6.7	12.7

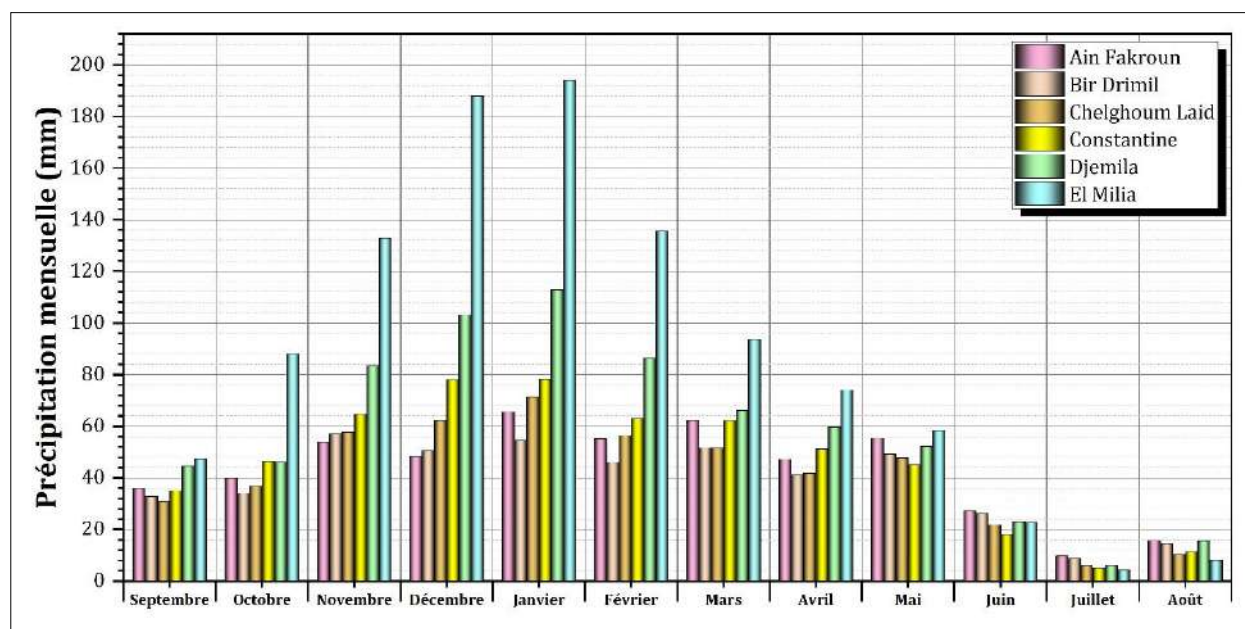


Figure 19 : Histogramme des précipitations moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin du Kebir-Rhumel

La représentation graphique relative à la variation des précipitations moyennes mensuelles pour le bassin Kebir-Rhumel (figure 19) montre la persistance du caractère irrégulier du régime pluviométrique avec un maximum enregistré au mois de Janvier atteignant les 194.1 mm pour la station d'El Milia, 112.8 mm pour la station de Djemila, 78.3 mm pour la station de Constantine, 71.3 mm pour la station de Chelghoum Laid et 65.6 mm pour la station d' Ain Fakroun. Pour la station de Bir Drimil, son maximum atteint 56.9 mm au mois de Novembre. Un minimum est enregistré au mois de Juillet 9.7 mm pour la station de Ain Fakroun, 8.9 mm pour la station de Bir Drimil, 6.1 mm pour la station de Chelghoum Laid et la station de Djemila, 5.1 mm pour la station de Constantine et 4.3 mm pour la station d'El Milia.



Tableau 21 : Précipitation moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Medjerda »

Bassin versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Medjerda	Ain Dhala	39.9	32.7	37.4	28.6	30.1	37.4	46.9	36.5	47.6	14.4	16.2	18.3
	Bou Khadra	38.4	34.8	41.0	40.5	40.6	37.9	47.1	42.0	41.6	22.6	15.3	19.5
	M'Daourouch	38.2	44.4	61.1	73.1	75.3	66.4	67.0	51.5	49.1	19.6	10.0	14.3
	Ouenza	33.8	36.4	44.3	53.0	52.3	45.0	48.3	42.9	38.8	22.5	10.3	16.5
	Souk Ahras	40.3	54.7	77.1	107.8	108.2	91.5	86.1	64.1	52.1	18.5	5.4	11.0
	Tebessa	41.0	30.8	34.4	30.4	31.0	24.3	41.6	42.0	37.0	24.8	15.0	22.5
Moyenne mensuelle		38,6	39,0	49,2	55,6	56,2	50,4	56,2	46,5	44,4	20,4	12,0	17,0

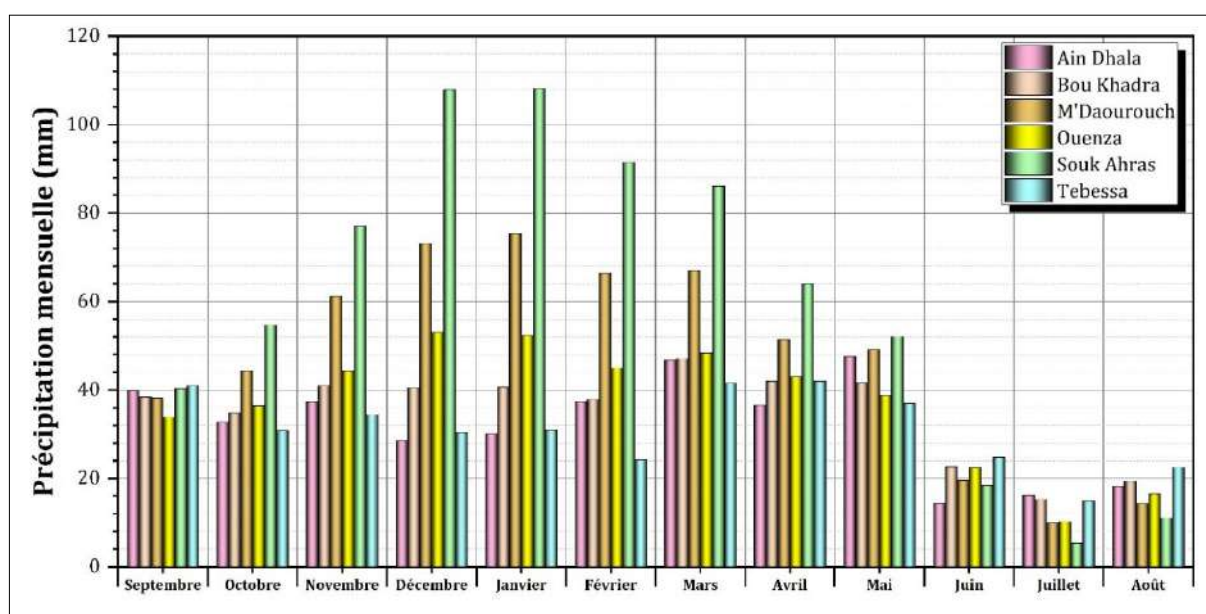


Figure 20 : Histogramme des précipitations moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin de la Medjerda

Les données recueillies au niveau des stations pour le bassin Medjerda (tableau 21) montrent que la variation des précipitations est soumise aux fluctuations saisonnières. Les moyennes mensuelles des hauteurs pluviométriques enregistrées dans ces six stations (figure 20) indiquent que le maximum est observé au mois de Janvier avec 108.2 mm pour la station de Souk Ahras, 75.3 mm pour la station de M'Daourouch, 40.6 mm pour la station de Bou Khadra, 31.0 mm pour la station de Tebessa. Pour la station d'Ouenza son maximum atteint 53.0 mm au mois de Décembre et la station d'Ain Dhala, son maximum atteint 37.4 mm au mois de Novembre, alors que le minimum est observé au mois de Juillet avec 15 mm pour la station de Bou Khadra et la station de Tebessa, 10 mm pour la station de M'Daourouch et la station de Ouenza. Pour la station d'Ain Dhala son minimum atteint 14.4 mm au mois de Juin.

Tableau 22 : Précipitation moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Hauts Plateaux »

Bassin versant	Station pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Hauts-Plateaux	Batna	36.0	27.5	38.9	33.9	31.6	28.0	37.1	31.9	34.9	18.6	8.2	16.4
	Foum el Gueiss	32.1	30.6	36.6	26.5	30.1	32.1	44.6	32.3	43.3	18.5	12.8	16.4
	Foum Toub	34.1	35.5	43.5	38.8	35.4	35.0	48.5	34.6	42.7	20.2	11.9	19.6
Moyenne mensuelle		34.1	31.2	39.7	33.1	32.3	31.7	43.4	32.9	40.3	19.1	11.0	17.5

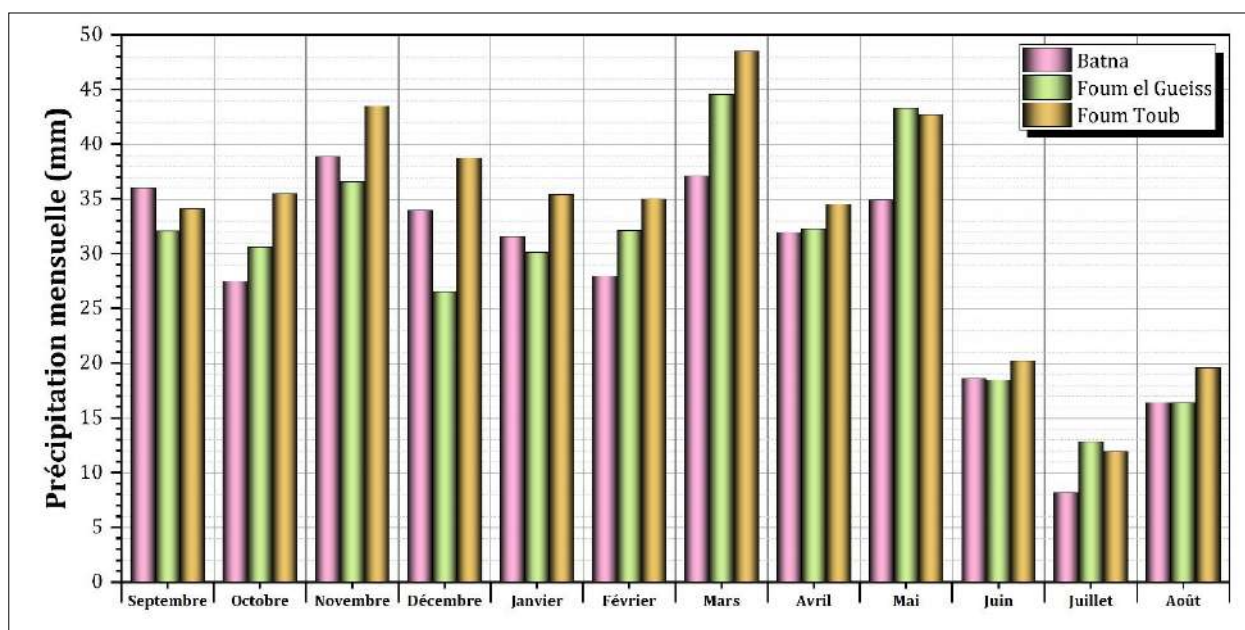


Figure 21 : Histogramme des précipitations moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin des Hauts Plateaux

Dans le graphe ci-dessous (figure 21) les hauteurs (en mm) des précipitations mensuelles pour le bassin Hauts Plateaux sont représentées. Le régime pluviométrique des trois stations (Batna, Foum el Gueiss et Foum Toub), est caractérisé par le mois le plus arrosé au niveau de la station de Foum Toub, qui est le mois de Mars avec 48.5 mm tandis que pour la station de Batna c'est le mois de Novembre. Le mois le moins pluvieux correspond au mois de juillet pour les trois stations avec 12.8 mm enregistrés au niveau de Foum el Gueiss, 11.9 mm au niveau de Foum Toub et 8.2 mm au niveau de Batna.

### 2.3. Températures moyennes annuelles

La température constitue le deuxième élément important dans l'étude du climat d'une région. Elle joue un rôle important dans l'estimation et le calcul de l'évaporation et l'évapotranspiration afin d'établir le bilan hydrique.

Les données correspondantes aux températures que nous possédons sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à 27 station durant 40 ans (1981/1982 - 2020/2021).

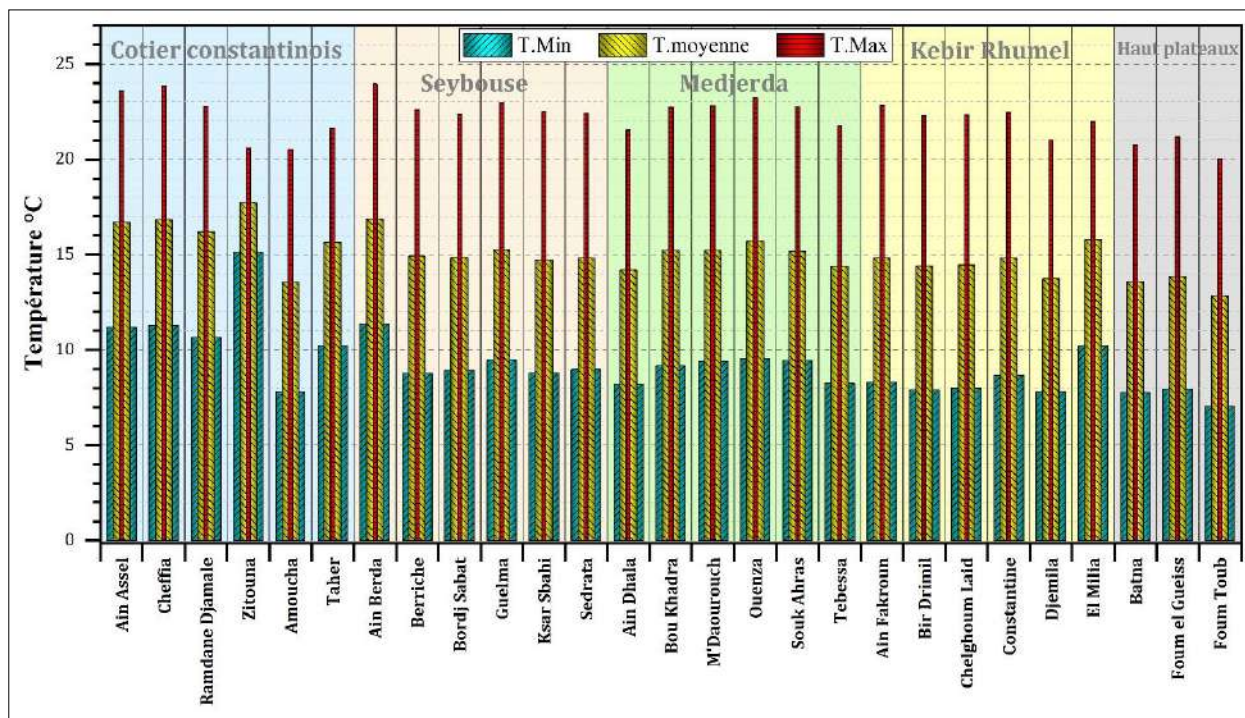


Figure 22 : Histogramme des températures moyenne annuelle de 1981 à 2021

Le long de la côte, les températures annuelles varient entre 13 et 17 °C, avec des maximales qui peuvent dépasser les 23 °C, notamment au niveau des stations d’Ain Assel et Cheffia. Les valeurs les plus faibles sont localisées dans le bassin des Côtiers Constantinois Ouest.

Les stations du bassin de la Seybouse enregistrent les températures les plus élevées de la région, avec des valeurs qui atteignent les 23.96 °C comme valeurs maximales (Ain Berda). Les températures moyenne annuelle varient entre 14 °C et 16 °C.

Le bassin de la Kebir Rhumel enregistre rarement des valeurs qui dépassent les 15 °C comme valeurs moyenne annuelle. Cette dernière varie entre 13 et 15 °C dans la région. Les valeurs maximales sont localisées aux niveaux des stations (Ain Fakroun et Constantine) avec des valeurs qui dépassent les 22 °C.

Les températures moyennes annuelles du bassin de la Medjerda varient entre 14.18°C à Ain Dhala et 15.7 °C à Ouenza.

Les valeurs des températures moyennes annuelles dans les trois stations du bassin des Haut plateaux sont de l’ordre de 12.83 °C pour la station de Foum Toub, 13.58 °C pour celle de Batna et 13.86 °C à Foum el Gueiss.

## 2.4. Températures moyennes mensuelles

Tableau 23 : Températures moyenne mensuelle entre 1981 et 2021 pour le bassin « Côtiers constantinois »

Bassin Versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Côtiers Constantinois E	Ain Assel	22.41	18.75	13.77	10.36	8.95	8.99	10.77	13.58	17.87	22.66	26.22	26.05
	Ramdane Djamaie	21.79	18.11	13.18	9.72	8.39	8.60	10.51	13.21	17.39	22.17	25.79	25.59
	Zitouna	23.01	20.13	16.11	12.92	11.72	11.63	12.94	14.79	17.74	21.51	24.78	25.39
	Taher	21.09	17.36	12.53	9.13	7.88	8.14	10.12	12.80	16.87	21.50	25.21	25.01
	Cheffia	22.52	18.88	13.89	10.45	9.03	9.09	10.88	13.67	17.98	22.80	26.40	26.20
	Amoucha	19.28	14.76	9.33	5.88	4.69	5.16	7.48	10.64	15.48	20.88	24.80	24.18
Moyenne mensuelle		<b>21.68</b>	<b>18.00</b>	<b>13.13</b>	<b>9.74</b>	<b>8.44</b>	<b>8.60</b>	<b>10.45</b>	<b>13.11</b>	<b>17.22</b>	<b>21.92</b>	<b>25.53</b>	<b>25.40</b>

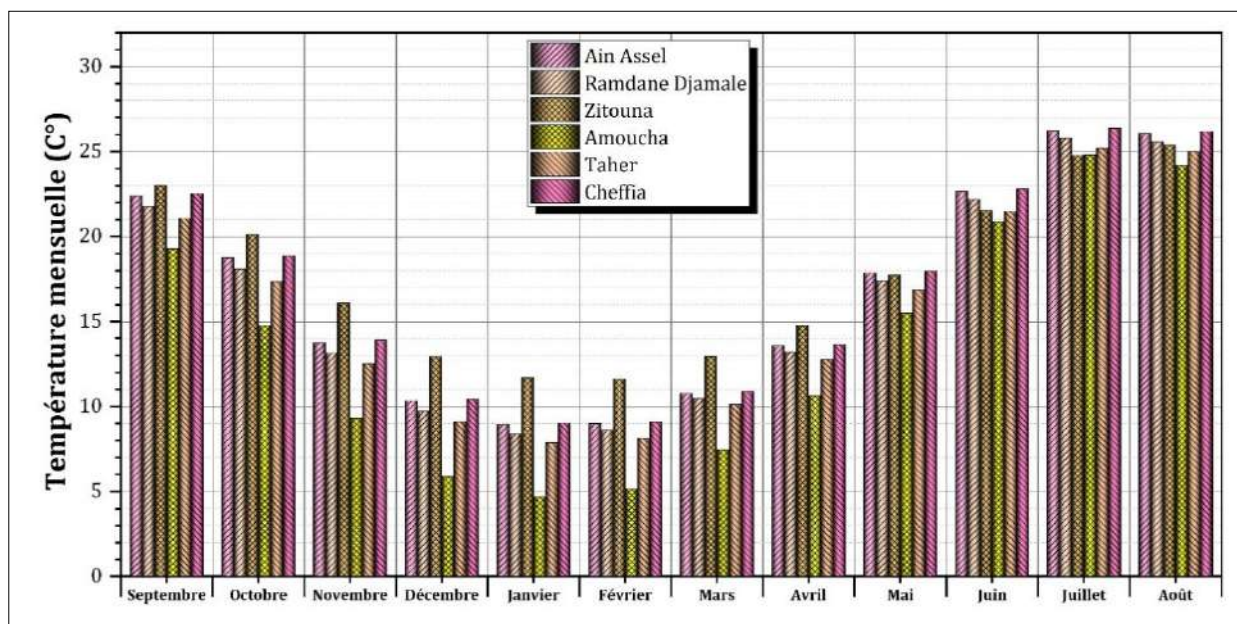


Figure 23 : Histogramme des températures moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin des Côtiers constantinois

Les données récoltées dans les six stations de mesures, nous donnent un schéma opposé à celui des précipitations. La variation de l'allure de l'histogramme prend cependant la forme d'un (U) où les minimums sont enregistrés pendant le mois de Février pour la station de Zitouna 11,63°C, le mois de Janvier pour Cheffia 9.03°C, Ain Assel 8.95°C, Ramdane Djamaie 8.39°C, Taher 7.88°C et Amoucha 4.69°C. les maximums sont alors notés pendant les mois d'Août et de Juillet.

Tableau 24 : Températures moyenne mensuelle entre 1971 et 2021 pour le bassin « Seybouse »

Bassin versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Seybouse	Ain Berda	22.62	18.94	13.92	10.42	9.01	9.09	10.88	13.69	18.07	22.99	26.61	26.40
	Berriche	20.91	16.05	10.04	6.35	5.18	6.00	8.59	12.33	17.57	23.18	26.84	25.98
	Bordj Sabat	20.78	16.46	10.93	7.33	5.97	6.44	8.71	11.81	16.54	21.90	25.79	25.36
	Guelma	21.26	17.08	11.56	7.94	6.58	6.91	9.02	12.04	16.80	22.20	26.11	25.71
	Ksar Sbahi	20.82	16.14	10.22	6.51	5.25	5.93	8.33	11.75	16.90	22.57	26.44	25.75
	Sedrata	20.89	16.28	10.39	6.69	5.43	6.08	8.44	11.79	16.89	22.54	26.40	25.73
Moyenne mensuelle		<b>21.21</b>	<b>16.83</b>	<b>11.18</b>	<b>7.54</b>	<b>6.24</b>	<b>6.74</b>	<b>9.00</b>	<b>12.23</b>	<b>17.13</b>	<b>22.56</b>	<b>26.36</b>	<b>25.82</b>

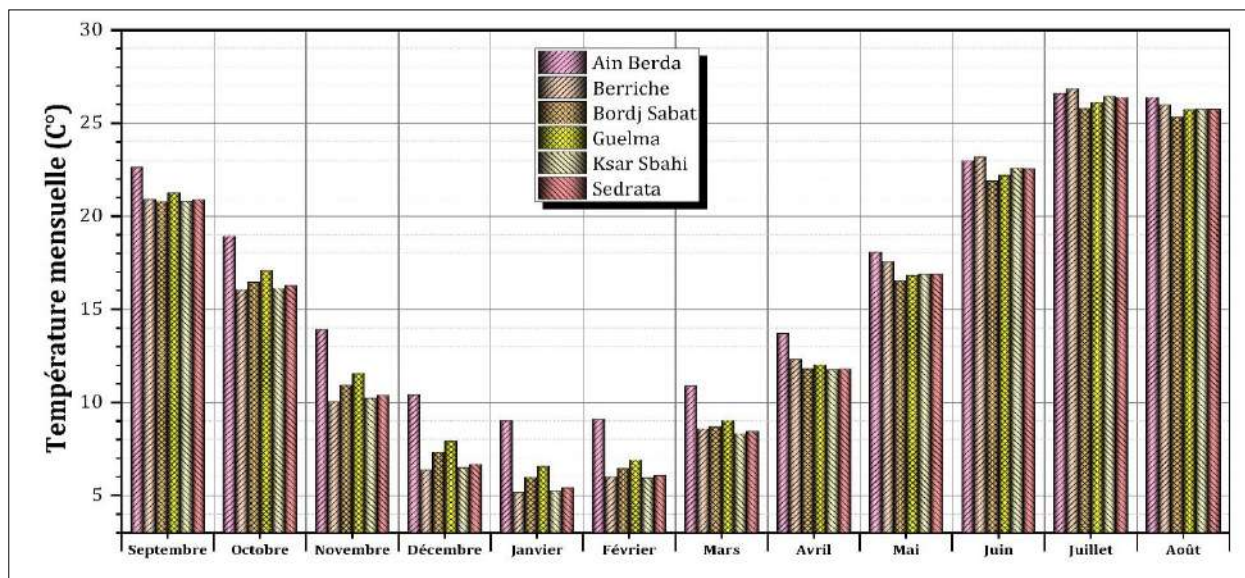


Figure 24 : Histogramme des températures moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin de la Seybouse

Nous remarquons, d’après la figure 24, que les faibles températures (période froide) correspondent aux mois de novembre, décembre, janvier, février, mars, avril et mai dont le mois le plus froid est celui du mois de Janvier entre 5 et 9°C. Les fortes températures (période chaude), qui ne dépassent pas les 27°C, caractérisent les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre où le mois de juillet est le mois le plus chaud avec une température de 26.84°C à la station de Berriche.

Tableau 25 : Températures moyenne mensuelle entre 1971 et 2021 pour le bassin « Kebir-Rhumel »

Bassin versant	Station pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû
Kebir-Rhumel	Ain Fakroun	20.75	15.75	9.73	6.11	5.02	5.85	8.51	12.31	17.64	23.28	26.95	25.97
	Bir Drimil	20.30	15.17	9.23	5.68	4.63	5.42	8.07	11.92	17.30	22.96	26.66	25.63
	Chelghoum Laid	20.46	15.46	9.52	5.93	4.76	5.47	8.02	11.66	16.97	22.79	26.65	25.78
	Constantine	20.82	16.29	10.61	7.01	5.67	6.22	8.61	11.92	16.74	22.19	26.09	25.54
	Djemila	19.56	14.96	9.36	5.92	4.69	5.21	7.59	10.84	15.71	21.21	25.20	24.56
	El Milia	21.26	17.53	12.67	9.24	7.97	8.24	10.21	12.92	17.01	21.66	25.33	25.12
Moyenne mensuelle		<b>20.52</b>	<b>15.86</b>	<b>10.19</b>	<b>6.65</b>	<b>5.46</b>	<b>6.07</b>	<b>8.50</b>	<b>11.93</b>	<b>16.90</b>	<b>22.35</b>	<b>26.15</b>	<b>25.43</b>

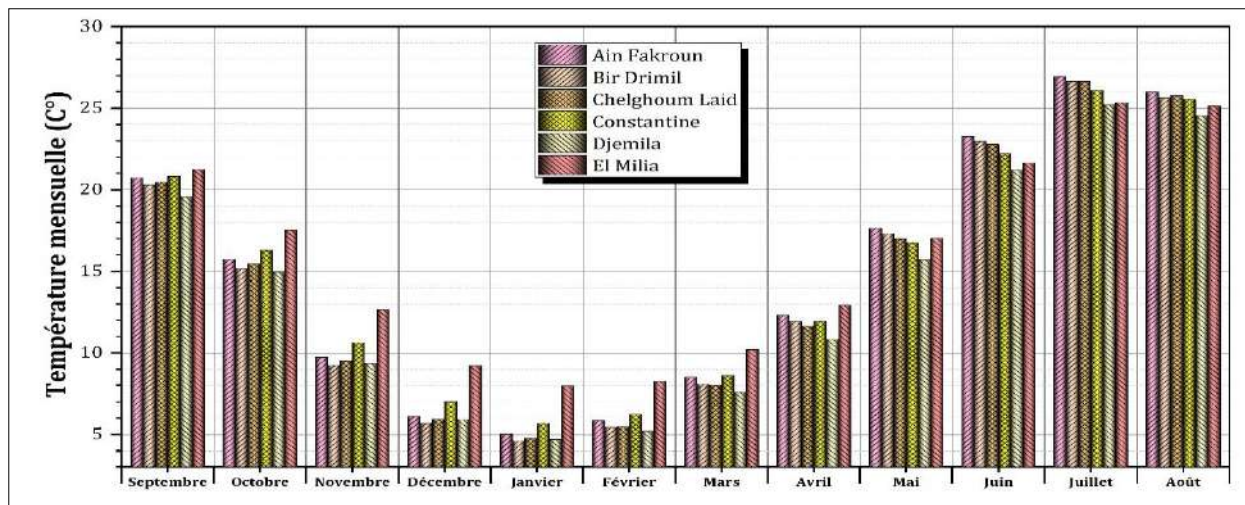


Figure 25 : Histogramme des températures moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin du Kebir-Rhumel

D'après le graphe (figure 25), on distingue que les plus fortes valeurs caractérisent les mois de Juillet et Août, pouvant atteindre 26°C. Les plus faibles valeurs sont enregistrées au mois de Janvier de 4 à 7°C.

Tableau 26 : Températures moyenne mensuelle entre 1971 et 2021 pour le bassin « Medjerda »

Bassin versant	Station Pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Medjerda	Ain Dhala	20.12	15.15	9.08	5.42	4.27	5.21	7.94	11.87	17.14	22.62	26.21	25.20
	Bou Khadra	21.20	16.42	10.50	6.78	5.55	6.37	8.99	12.74	17.89	23.32	26.89	26.07
	M'Daourouch	21.27	16.73	10.87	7.17	5.91	6.53	8.88	12.26	17.32	22.86	26.63	26.01
	Ouenza	21.66	16.96	11.07	7.36	6.11	6.89	9.45	13.15	18.33	23.74	27.24	26.52
	Souk Ahras	21.14	16.95	11.41	7.84	6.50	6.86	8.95	12.04	16.77	22.12	25.97	25.54
	Tebessa	20.20	15.42	9.55	5.91	4.71	5.63	8.29	12.08	17.24	22.58	26.10	25.16
Moyenne mensuelle		20.93	16.27	10.42	6.75	5.51	6.25	8.75	12.36	17.45	22.87	26.51	25.75

L'histogramme des températures moyennes mensuelles montre une différence assez proche entre les températures des six stations (figure 26).

Les valeurs les plus faibles sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où l'on remarque que le mois le plus froid est le mois de janvier (avec une température de l'ordre de 4.27°C à Ain Dhala et de 7.84°C à Souk Ahras). Par contre les valeurs les plus élevées caractérisent les mois de juin, juillet et août où l'on remarque que le mois le plus chaud est le mois de Juillet (avec une température de l'ordre de 25.97°C à Souk Ahras et de 27.24°C à Ouenza).

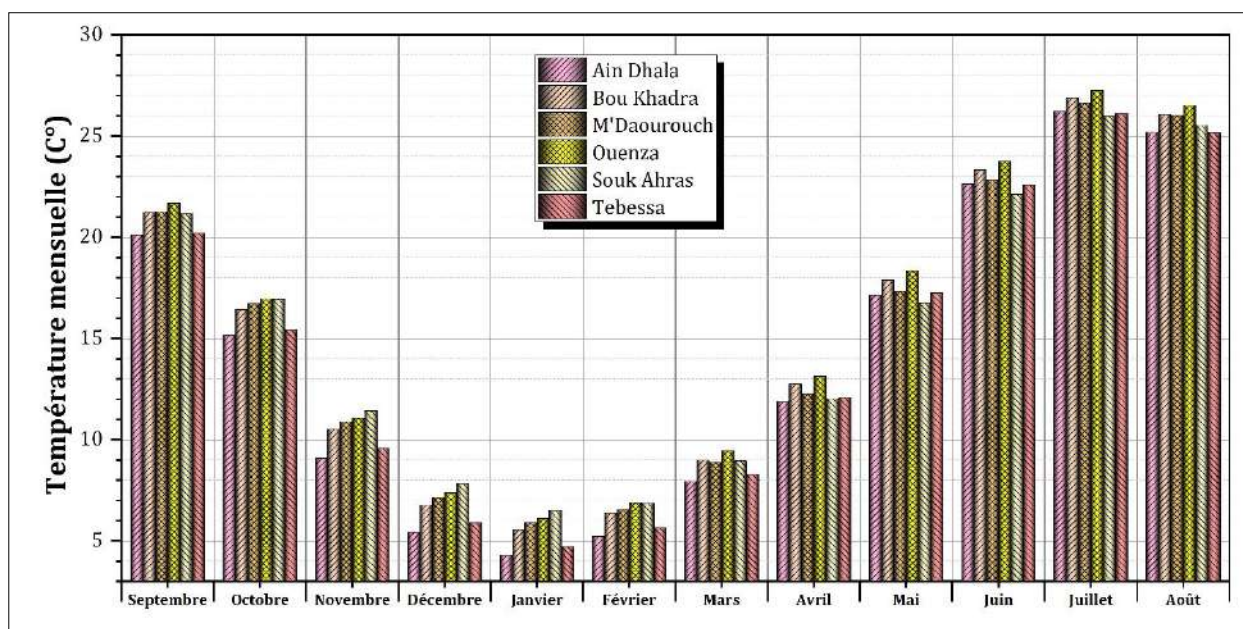


Figure 26 : Histogramme des températures moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin de la Medjerda

D'après la figure.27, les températures sont très basses au mois de Janvier, elles augmentent pour atteindre leur maximum en Juillet et Août, puis elles décroissent du mois de Septembre vers le mois de Décembre.

Le mois de Janvier est le mois le plus froid pour les trois stations, avec une température moyenne mensuelle de l'ordre de 3.96°C pour la station de Foug el Gueiss, 3.39°C pour la station de Batna et 2.95°C à Foug Toub. Tandis que le mois de Juillet est le mois le plus chaud, avec une température moyenne mensuelle de 26.02°C pour la station de Batna, 26°C pour la station de Foug el Gueiss et 25.08°C à Foug Toub.

Tableau 27 : Températures moyenne mensuelle entre 1971 et 2021 pour le bassin « Hauts Plateaux »

Bassin versant	Station pluviométrique	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août
Hauts-Plateaux	Batna	19.48	14.00	8.02	4.51	3.39	4.47	7.45	11.46	16.88	22.46	26.02	24.84
	Foug el Gueiss	19.79	14.66	8.61	5.05	3.96	4.90	7.67	11.58	16.88	22.35	26.00	24.95
	Foug Toub	18.64	13.35	7.48	4.03	2.95	3.90	6.73	10.62	15.89	21.40	25.08	23.94
Moyenne mensuelle		19.30	14.01	8.04	4.53	3.43	4.42	7.28	11.22	16.55	22.07	25.70	24.58

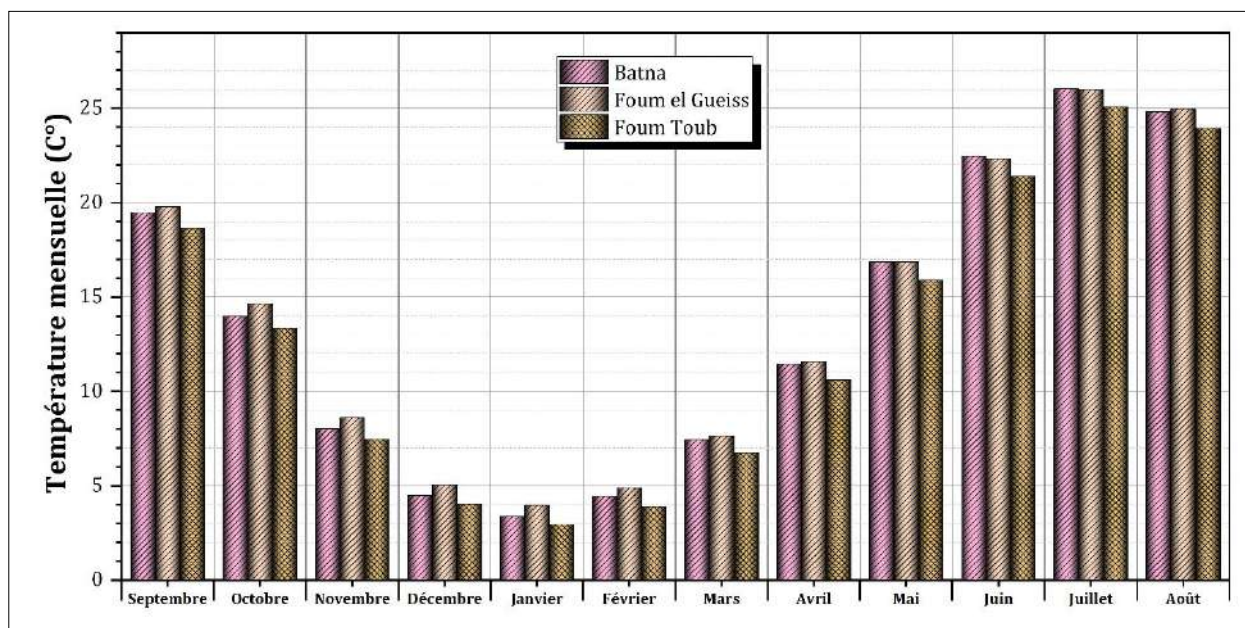


Figure 27 : Histogramme des températures moyenne mensuelle de 1981 à 2021 pour le bassin des Hauts Plateaux

### 3. Type de climat

#### 3.1. Diagramme pluvio-thermique (Relation précipitation – température)

Appelé aussi le diagramme ombrothermique. Selon Bagnouls et Gaussen, (1957), ces diagrammes représentent une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèches et humides de l'année, sur un même système d'axes, montrant la variation des températures et celle des précipitations moyennes mensuelles.

Nous avons représenté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées, tandis que les différents mois de l'année sont

indiqués sur l'axe des abscisses. Cette formule ( $P \leq 2T$ ) permet de construire des diagrammes Pluviothermiques traduisant la durée de la saison sèche en fonction des intersections des deux courbes.

D'après les diagrammes ci- après on peut déduire deux saisons bien distinctes :

- Une saison humide, caractérisée par des précipitations relativement élevées 107.69, 102.81, 54.9 et 43.39 mm s'étalant du début du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai respectivement pour les bassins, Kebir-Rhumel, Seybouse, Medjerda et les Hauts Plateaux. Pour les bassins des Côtiers constantinois, la saison humide s'étend du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai avec des précipitations maximale de l'ordre de 167.36 mm pour le bassin Côtiers constantinois-centre, 145.21 mm pour le bassin Côtiers constantinois-est et 132.37 mm pour le bassin Côtiers constantinois-ouest.
- Une saison sèche et chaude pour le reste des mois de l'année.

En général, les périodes humides aux stations étudiées sont caractérisées par des températures très basses par rapport à la température moyenne annuelle, surtout en janvier, et par des précipitations maximales, surtout entre novembre et décembre. Les périodes sèches sont caractérisées par de faibles précipitations, notamment en juin, juillet et août lorsque les températures sont plus élevées.

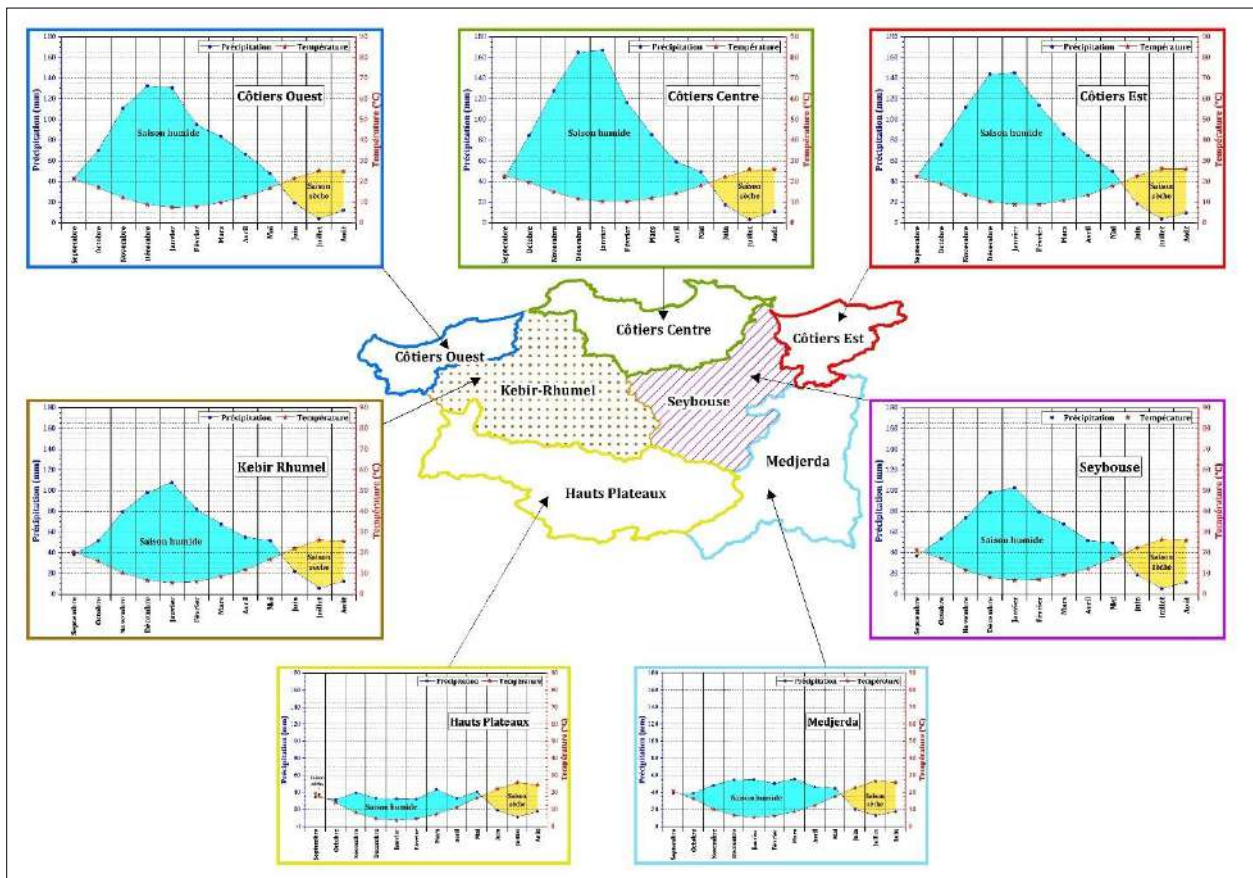


Figure 28 : Diagrammes Pluviothermiques aux différentes bassin versant

En résumé, les diagrammes ci-dessus (figure 28), montrent que la saison humide s'étend du début du mois de d'octobre jusqu'au début du mois mai et l'inverse pour la saison sèche, à l'exception



pour les bassins des Côtiers constantinois, dont la saison humide s'étend du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai, avec une température maximale de l'ordre 26.26°C au mois d'Juillet enregistrée dans le bassin Côtiers constantinois-est, et une précipitation maximale de l'ordre de 167,36 mm dans le mois de décembre enregistrée dans le bassin Côtiers constantinois-centre.

### 3.2. Indice d'aridité de Emmanuel de MARTONNE

#### 3.2.1. Indice d'aridité annuel

En 1926, Emmanuel De Martonne élabore un système de classification des climats en utilisant une méthode statistique. Il utilise un indice regroupant des données hydrométriques et thermiques (De Martonne ,1926). Cette méthode statistique est caractérisée par la formule suivante :

$$I_A = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

$I_A$  : Indice d'aridité annuelle

P : précipitation annuelle moyenne (mm)

T : température annuelle moyenne (C°)

Selon DE MARTONNE :

- $I > 30$  : climat humide (l'écoulement est abondant).
- $20 < I < 30$  : climat tempéré.
- $10 < I < 20$  : climat semi-aride.
- $5 < I < 10$  : climat aride.
- $I < 5$  : climat hyper aride.

L'application de cette formule, donne les résultats récapitulés dans le Tableau. 28.

Tableau 28 : Valeurs de l'indice d'aridité annuel

Station	Précipitation en mm	Température en °C	Indice d'aridité
Ain Assel	858.24	16.70	32.15
Ramdane Djamale	688.58	16.20	26.28
Zitouna	1546.78	17.72	55.80
Taher	927.14	15.64	36.17
Cheffia	851.56	16.81	31.76
Amoucha	682.72	13.55	28.99
Ain Berda	724.34	16.89	26.94
Berriche	451.28	14.92	18.11
Bordj Sabat	708.00	14.84	28.51
Guelma	606.32	15.27	24.00
Ksar Sbahi	519.54	14.72	21.02
Sedrata	536.76	14.79	21.65
Ain Fakroun	516.90	14.82	20.82
Bir Drimil	466.48	14.41	19.11
Chelghoum Laid	494.62	14.46	20.22

<b>Constantine</b>	558.78	14.81	22.52
<b>Djemila</b>	699.14	13.73	29.46
<b>El Milia</b>	1047.30	15.76	40.65
<b>Ain Dhala</b>	386.08	14.19	15.96
<b>Bou Khadra</b>	421.32	15.23	16.70
<b>M'Daourouch</b>	570.04	15.20	22.62
<b>Ouenza</b>	444.22	15.71	17.28
<b>Souk Ahras</b>	716.86	15.18	28.47
<b>Tebessa</b>	374.74	14.41	15.35
<b>Batna</b>	343.08	13.58	14.55
<b>Foum el Gueiss</b>	355.94	13.87	14.91
<b>Foum Toub</b>	399.80	12.83	17.51

Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que le climat du bassin de Côtiers constantinois est de type humide. Pour le bassin de Seybouse et Kebir-Rhumel les valeurs de l'indice d'aridité sont comprises entre 21 et 28 ce qui indique un climat tempéré sauf pour les deux stations de Berriche et Bir Drimil où le climat est de type semi-aride.

Une valeur de De Martonne situé entre 10 et 20, indique un régime climatique semi-aride.

Selon les valeurs des stations du bassin de Medjerda, nous pouvons affirmer que le climat est de type semi-aride sauf pour les deux stations de M'Daourouch et Souk Ahras le climat est de type tempéré.

Pour les trois stations du bassin d'Hauts Plateaux l'indice climatique est compris entre 10 et 20 avec 14.55 pour la station de Batna, 14.91 pour la station de Foum el Gueiss et 17.51, pour la station de Foum Toub. Donc le climat du bassin est de type semi-aride.

### 3.2.2. Indice d'aridité mensuel

L'indice d'aridité mensuel, noté  $I_A$ , est donné par la formule suivante (ROUABHIA, 2006) :

$$I_M = \frac{12 \times P}{T + 10}$$

Avec :

$I_M$  : Indice d'aridité mensuel

P : précipitation moyenne mensuelle (mm)

T : température moyenne mensuelle (C°)

L'application de cette formule aux niveaux de 27 stations donne les résultats récapitulés dans le tableau suivant

Tableau 29 : Valeurs de l'indice d'aridité mensuel

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JUI	A
Ain Assel	17.07	31.99	60.48	84.64	89.66	69.30	46.28	31.23	20.09	6.76	1.17	3.57
Ramdane Djamale	12.69	26.74	44.71	65.44	77.58	55.62	42.10	26.53	19.53	5.18	1.13	2.76
Zitouna	23.94	50.61	99.70	145.36	153.71	108.66	74.94	49.70	36.09	11.11	1.53	7.55

Taher	17.37	39.80	69.19	100.24	96.74	71.65	55.95	37.54	22.29	7.79	1.17	3.54
Cheffia	15.39	29.34	50.78	83.04	91.66	71.18	50.80	33.27	22.95	6.72	1.15	2.88
Amoucha	16.93	23.32	53.23	76.13	92.84	62.57	45.06	33.23	23.12	8.34	2.09	5.17
Ain Berda	13.66	27.08	45.87	73.30	78.13	56.30	39.10	25.47	18.22	6.05	1.15	3.75
Berriche	14.23	16.78	27.14	33.89	41.97	38.06	33.37	21.16	21.70	6.40	3.56	4.43
Bordj Sabat	14.35	25.00	42.37	77.47	91.27	63.84	45.81	30.56	26.12	8.18	1.16	3.86
Guelma	11.72	21.93	37.41	62.01	70.27	52.00	40.73	27.21	21.59	6.88	1.16	3.82
Ksar Sbahi	13.41	18.38	30.84	47.00	60.49	45.94	37.59	23.64	23.08	7.45	2.34	3.78
Sedrata	13.87	18.87	33.09	51.02	62.52	46.95	38.06	25.26	21.42	6.49	2.68	3.75
Ain Fakroun	14.07	18.62	32.84	36.10	52.37	41.74	40.44	25.45	24.05	9.79	3.16	5.28
Bir Drimil	13.00	16.25	35.53	38.67	44.73	35.79	34.33	22.45	21.58	9.56	2.91	4.92
Chelghoum Laid	12.12	17.33	35.43	47.00	58.00	43.78	34.41	23.04	21.28	8.00	2.01	3.42
Constantine	13.67	21.22	37.62	55.10	59.95	46.60	40.13	28.01	20.24	6.76	1.71	3.85
Djemila	18.10	22.20	51.65	77.79	92.08	68.16	45.06	34.31	24.36	8.87	2.07	5.48
El Milia	18.21	38.34	70.35	117.26	129.65	89.17	55.60	38.77	25.97	8.61	1.47	2.80
Ain Dhala	15.90	15.62	23.52	22.27	25.27	29.53	31.36	20.05	21.04	5.31	5.36	6.23
Bou Khadra	14.77	15.80	23.99	28.98	31.32	27.79	29.75	22.17	17.91	8.15	4.98	6.47
M'Daourouch	14.67	19.92	35.15	51.12	56.79	48.19	42.57	27.75	21.57	7.15	3.29	4.77
Ouenza	12.82	16.21	25.23	36.66	38.94	31.96	29.83	22.25	16.43	8.00	3.32	5.43
Souk Ahras	15.53	24.38	43.20	72.53	78.65	65.13	54.50	34.89	23.34	6.92	1.80	3.73
Tebessa	16.29	14.55	21.13	22.91	25.26	18.62	27.28	22.85	16.28	9.13	4.99	7.69
Batna	14.66	13.76	25.89	28.07	28.31	23.22	25.53	17.85	15.59	6.88	2.72	5.66
Foum el Gueiss	12.92	14.90	23.59	21.16	25.87	25.87	30.27	17.95	19.34	6.86	4.27	5.63
Foum Toub	14.29	18.22	29.86	33.16	32.76	30.24	34.77	20.12	19.81	7.74	4.08	6.93

D'après le tableau n°29, les résultats obtenus montrent que les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril déterminent d'un climat humide. Le moi de Mai présente un climat tempéré. Le climat semi-aride caractérise les mois de Septembre et Octobre, alors que le climat aride à hyperaride marque les mois de Juin, Juillet et Aout.

### 3.3. Cartographie de l'indice d'aridité

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'indice d'aridité sur une période allant de 1981 à 2021, a permis de situer la région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) dans son contexte spatio-temporel (figure 29).

Après les calculs de l'indice d'aridité pour toutes les stations, ils ont été introduit dans le logiciel ArcGis. Ce dernier offre de nombreuses approches d'interpolation. Dans cette étude, la méthode d'interpolation de krigeage ordinaire de type sphérique a été utilisée pour bien cartographie l'indice d'aridité.

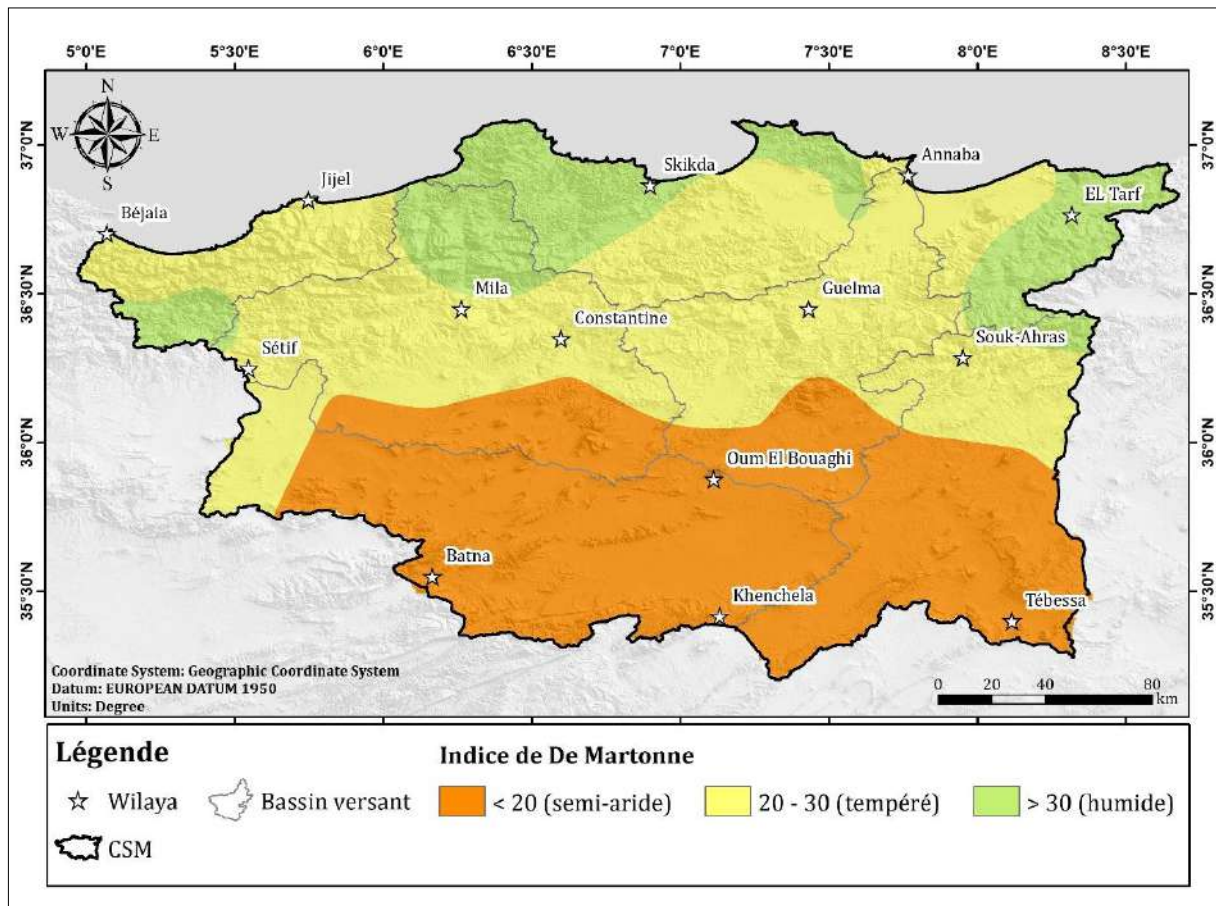


Figure 29 : Type de climat selon l'indice d'aridité de Martonne

Les résultats obtenus montrent que les stations du nord et nord-est présentent des indices supérieurs à 30, indiquant un climat de type humide. Il s'agit principalement des stations du littoral qui représentent 15% de la surface totale de la région d'étude. En se déplaçant vers l'intérieur, on rencontre les stations du climat tempéré ayant des indices entre 20 et 30, comme Guelma, Constantine, Sétif, ect. Il s'agit du type climatique le plus présent, couvrant plus de 43% de la surface. Les résultats obtenus révèlent également que les stations du sud possèdent un climat de type semi-aride avec des indices allant de 13.27 à 20. Il s'agit en l'occurrence de : Tébessa, Khenchela, Oum El Bouaghi et Batna.

### 3.4. Climagramme de L. EMBERGER :

Au cours de ses recherches, Louis Emberger a constaté une grande variation de distribution des végétaux dans le bassin méditerranéen. Il a établi un lien entre la variation de la répartition des végétaux et la variation de P, de T, de M et de m.

Le climagramme d'EMBERGER permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée. Il est déterminé à partir de la formule Emberger (1955) :

$$Q = \frac{1000 P_a}{\left(\frac{M+m}{2}\right) (M - m)}$$

Q : quotient ombrothermique d'Emberger

Pa : pluviométrie annuelle en mm

M : moyenne des températures du mois le plus chaud en degré Kelvin ( $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$ )

m : moyenne des températures du mois le plus frais en degré Kelvin

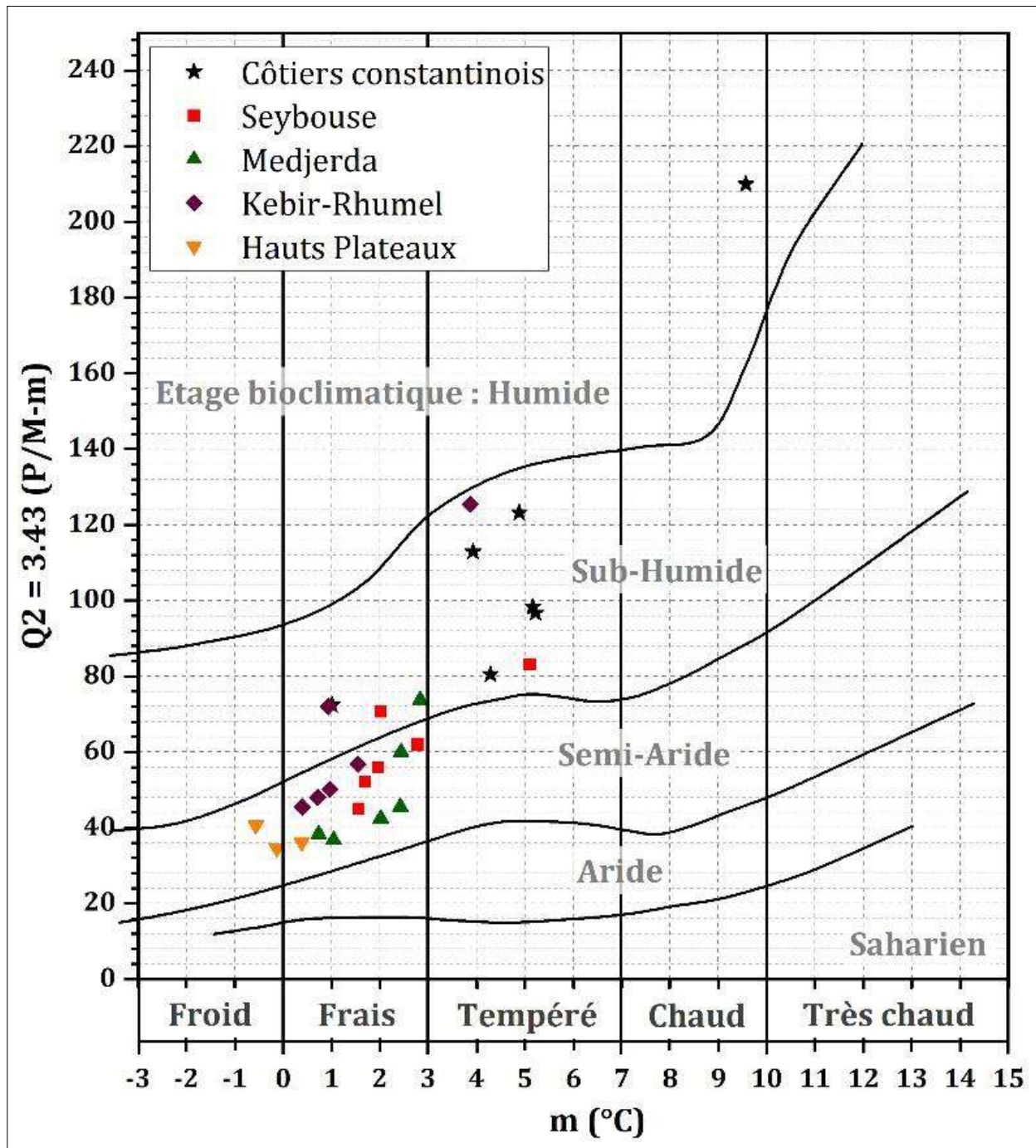


Figure 30 : Climagramme d'EMBERGER

Selon les valeurs du quotient pluviométrique (Q), les chercheurs ont classé en cinq étages bioclimatiques : Humide, Subhumide, Semi-aride, Aride et Saharien, et quatre variantes thermiques : à hiver froid, à hiver frais, à hiver doux ou tempéré et à hiver chaud.

Le climagramme d'Emberger (figure 30), permet de constater que l'étage bioclimatique des stations du bassin de Medjerda et des Hauts Plateaux est de type semi arid frais. Pour le bassin de Seybouse et Kebir-Rhumel les stations sont situées dans deux milieux semi arid et sub-humide. les stations du bassin de Côtiers constantinois sont classées dans l'étage bioclimatique sub-humide tempéré, sauf pour la station de Zitouna qui se trouve à l'étage bioclimatique humide à hiver chaud.

#### 4. Bilan hydrique :

Le bilan hydrologique est principalement utilisé pour déterminer la relation entre les apports et les pertes d'une unité hydrologique donnée sur une période de temps. Il dépend de divers facteurs du système hydrologique, tels que les précipitations, ruissellement, infiltration, évapotranspiration. Pour estimer ce bilan, la méthode de Thornthwaite (1948) est la plus appropriée dans les régions semi-arides et le climat méditerranéennes.

Il est calculé selon la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm).

R : Ruissellement moyen annuel en (mm).

I : infiltration moyenne (mm).

##### 4.1. Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite :

Cette méthode est basée sur la notion de **RFU** (réserve en eau dans le sol facilement utilisable par les plantes). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum.

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, température (T°C), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i)) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \cdot K$$

$$\text{où } I = \sum i = \sum \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \text{et} \quad a = 0.016I + 0.5$$

Avec :

T : Température moyenne annuelle °C.

i : Indice thermique mensuel.

I : Somme des indices mensuels.

ETP : Evapotranspiration potentiel mensuelle en mm.

K : terme correctif dépend de la durée d'insolation.

#### 4.2. Interprétation du bilan hydrique :

Après avoir calculé le bilan d'eau des bassins versants, et d'après la représentation graphique des bilans selon la méthode de Thornthwaite (figure 31 et 32), on constate que :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans les bassins versants (Côtiers constantinois, Seybouse, Medjerda, Kebir-Rhumel et Hauts Plateaux) atteint son maximum au mois de Juillet avec 113.32 mm, 115.75 mm, 118.06 mm, 115.13 mm et 113.67 mm et un minimum de 21.89 mm, 17.21 mm, 13.08 mm, 13.94 mm et 8.43 mm au mois de Février successivement pour les sept bassins versants.

L'évapotranspiration réelle (ETR) totale pour les bassins versants est de l'ordre de 520.73 mm (Côtiers constantinois), 443.97 mm (Seybouse), 425.08 mm (Medjerda), 435.16 mm (Kebir-Rhumel) et (366.27mm) Hauts Plateaux.

L'évapotranspiration est supérieure à la précipitation à partir du mois de juin jusqu'à octobre avec un maximum qui dépasse les 100 mm pendant le mois de juillet. Donc durant ces 5 mois on est face à un déficit agricole qui nécessite une irrigation pour les zones de culture. Ce déficit atteint son maximum pendant le mois de juillet ; avec 102 mm (Hauts Plateaux), 105 mm (Medjerda), 109 mm (Côtiers constantinois et Kebir-Rhumel) et 110 mm (Seybouse).

La réserve facilement utilisable (RFU) commence à se reconstituer à partir du mois de d'octobre pour le bassin des Côtiers constantinois et mois de Novembre pour les autres bassins versants. Elle atteint son maximum (100 mm) au mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril. La RFU décroît à partir du mois de Mai jusqu'à l'épuisement totale du stock au mois de Juin d'où l'apparition du déficit agricole qui s'étend jusqu'à la fin du mois d'Octobre dans tous les bassins versants. Par contre, l'apparition de l'excédent (EXC) maximal se produit à partir du mois de Février jusqu'à Mars pour le bassin de Medjerda, et de Décembre jusqu'à Avril pour les autres bassins versants, avec des valeurs de l'ordre de 120.87, 85.61, 27.03, et 93.75 mm respectivement pour le bassin des Côtiers constantinois, Seybouse, Medjerda et Kebir-Rhumel. Pour le bassin des Hauts Plateaux l'excédent (EXC) est nul pendant l'année hydrologique.

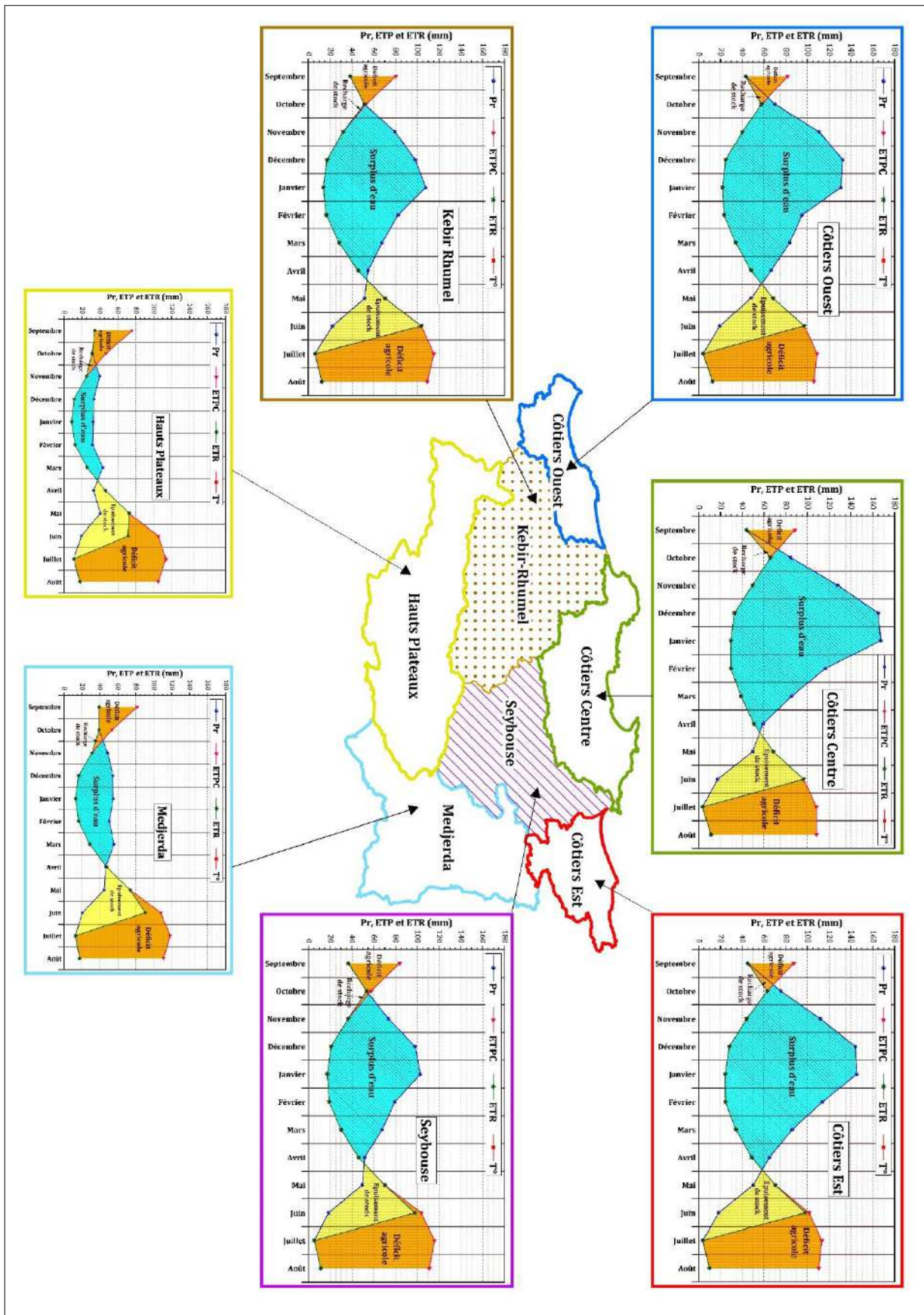


Figure 31 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite



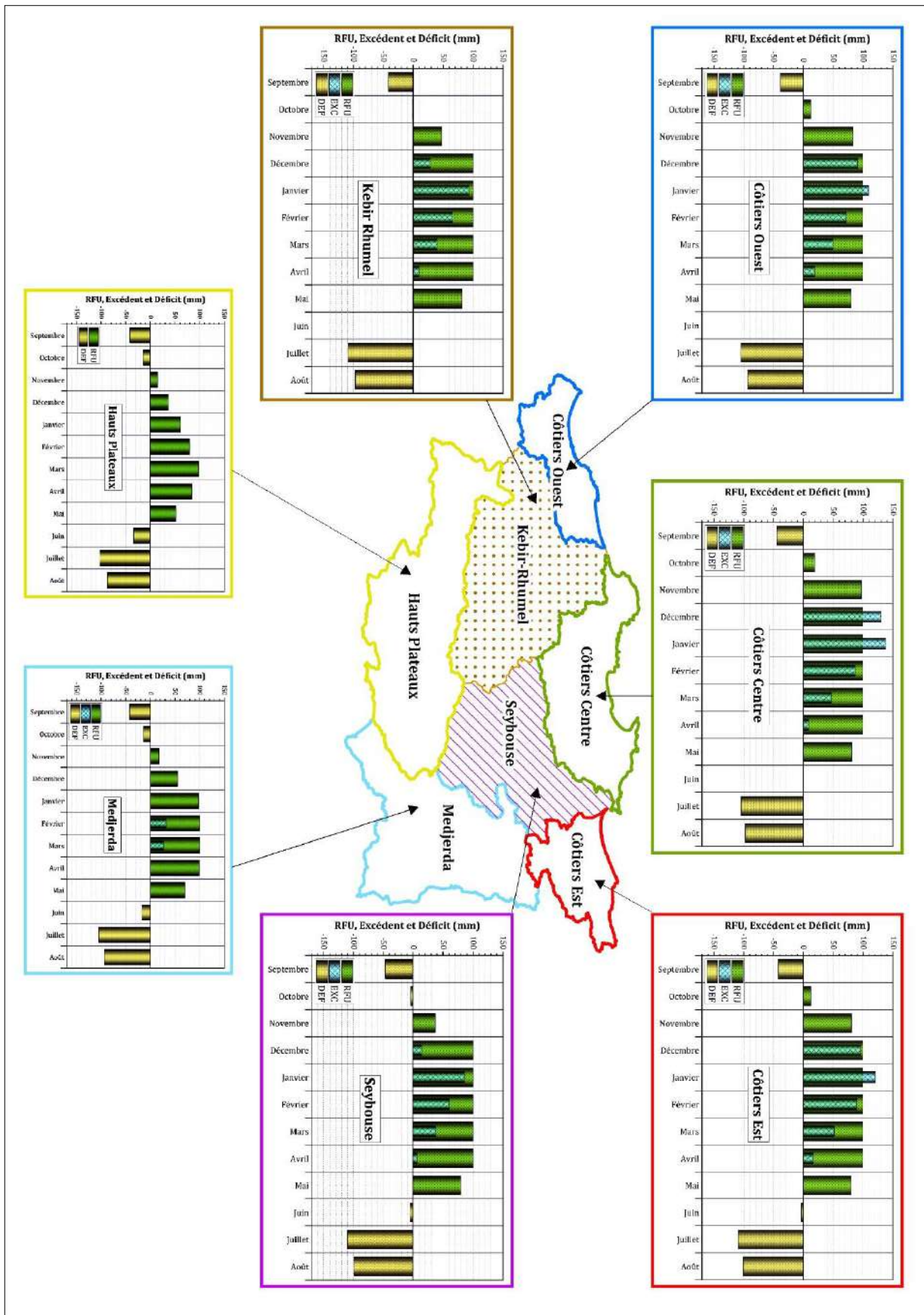


Figure 32 : Représentation graphique de RFU, Excédent et Déficit (mm)

## 5. Conclusion

L'étude climatique a été élaborée sur la base d'une série de mesures correspondant à une période d'observation de 40 ans (de 1981 à 2021). Elle montre que la zone d'étude est soumise à un climat humide à semi aride caractérisé par deux saisons distinctes:

L'une humide marquée par une forte pluviosité allant du début du mois de Septembre jusqu'au début de Mai et par de faibles températures, l'autre est sèche, relativement courte s'établissant de la fin du mois Mai jusqu'au début du mois de Septembre.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes comprises entre 1546.78 mm à Zitouna localisées aux niveaux du bassin des Cotiers Constantinois Centre et 343.08 mm à Batna localisées aux niveaux du bassin des Hauts plateaux.

La variation mensuelle des températures donne des valeurs plus élevées enregistrées au cours de la période de Juin à Août avec un maximum pour la plupart des stations en juillet. Ces valeurs ont diminué durant la période de Septembre à Février, avec des valeurs inférieures à 8 mm enregistrées en Janvier.

L'évapotranspiration est supérieure à la précipitation à partir du mois de juin jusqu'à octobre, avec un maximum qui dépasse les 100 mm pendant le mois de juillet. Donc durant ces 5 mois on est face à un déficit agricole ce qui nécessite une irrigation pour les zones de culture.

La réserve facilement utilisable (RFU) commence à se reconstituer à partir du mois de d'octobre pour le bassin des Côtiers constantinois et le mois de Novembre pour les autres bassins versants, elle atteint son maximum (100 mm) au mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril. La RFU décroît à partir du mois de Mai jusqu'à l'épuisement totale du stock au mois de Juin, d'où l'apparition du déficit agricole qui s'étend jusqu'à la fin du mois d'Octobre au niveau de toutes les bassins versants.



# **Chapitre IV**

## *Analyse et cartographie des précipitations*





## 2. Analyse des Précipitations

### 2.1. Précipitations moyennes annuelles

Les pluies moyennes annuelles sont comprises dans l'ensemble entre 600 et 1500 mm dans le bassin des Côtiers constantinois. Des pluies moyennes supérieures à 1000 mm sont enregistrées aux stations situées plus au Nord. Alors, dans le bassin des Côtiers constantinois-Ouest, les pluies moyennes annuelles sont comprises entre 600 et 900 mm. Des valeurs de pluies moyennes supérieures à 800 mm sont enregistrées aux stations situées au Nord-Est de ce bassin (927.14 mm à la station Taher et 966 mm à la station Erraguene) (figure 34, 35 et 36).

Les pluies moyennes annuelles du bassin Medjerda sont comprises entre 300 et 700 mm. Des pluies moyennes supérieures à 600 mm sont enregistrées au nord du bassin (686.12 mm à la station Taoura et 716.86 mm à la station Souk Ahras).

Les pluies moyennes annuelles sont comprises dans le bassin Seybouse entre 400 et 800 mm. Des pluies moyennes supérieures à 800 mm sont enregistrées aux stations situées au Nord et au Nord-Est du bassin (818.46 mm à la station Annaba et 825.74 mm à la station Mechrouka).

Les pluies moyennes annuelles du bassin Kebir-Rhumel sont comprises entre 400 et 1000 mm. Des pluies moyennes supérieures à 1000 mm sont enregistrées au nord (1047.3 mm à la station El Milia). Les pluies moyennes annuelles ne dépassent guère les 400 mm dans le bassin des Hauts Plateaux.

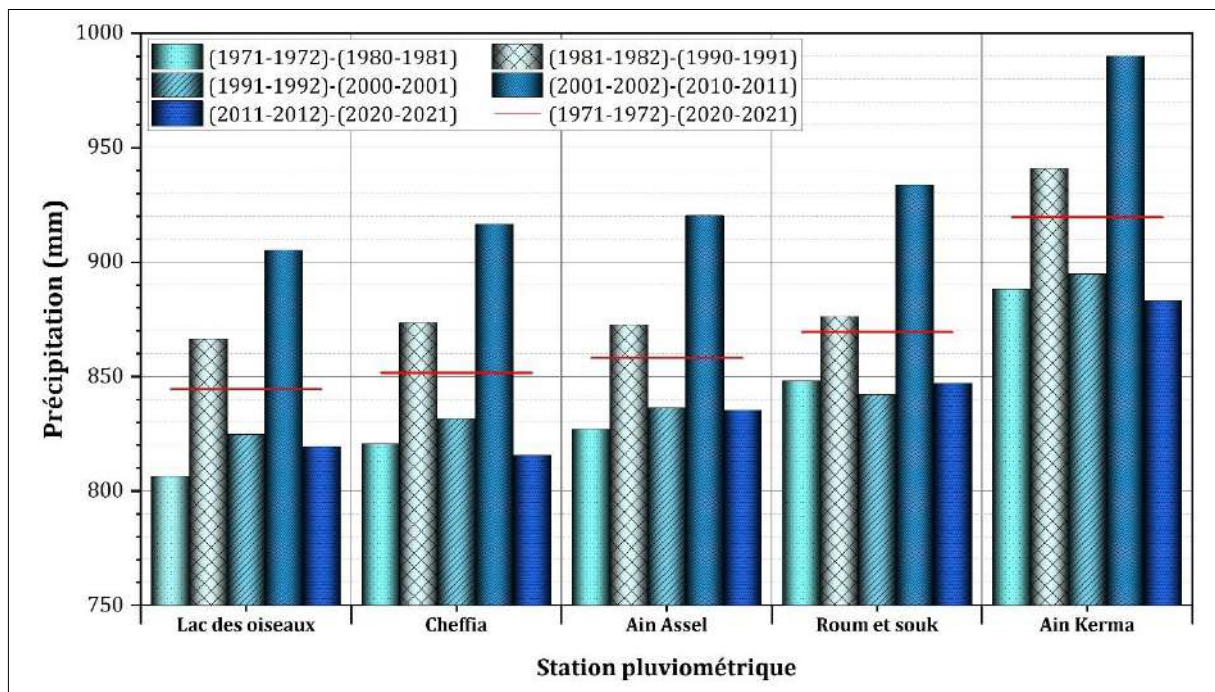


Figure 34 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin des Côtiers constantinois-Est

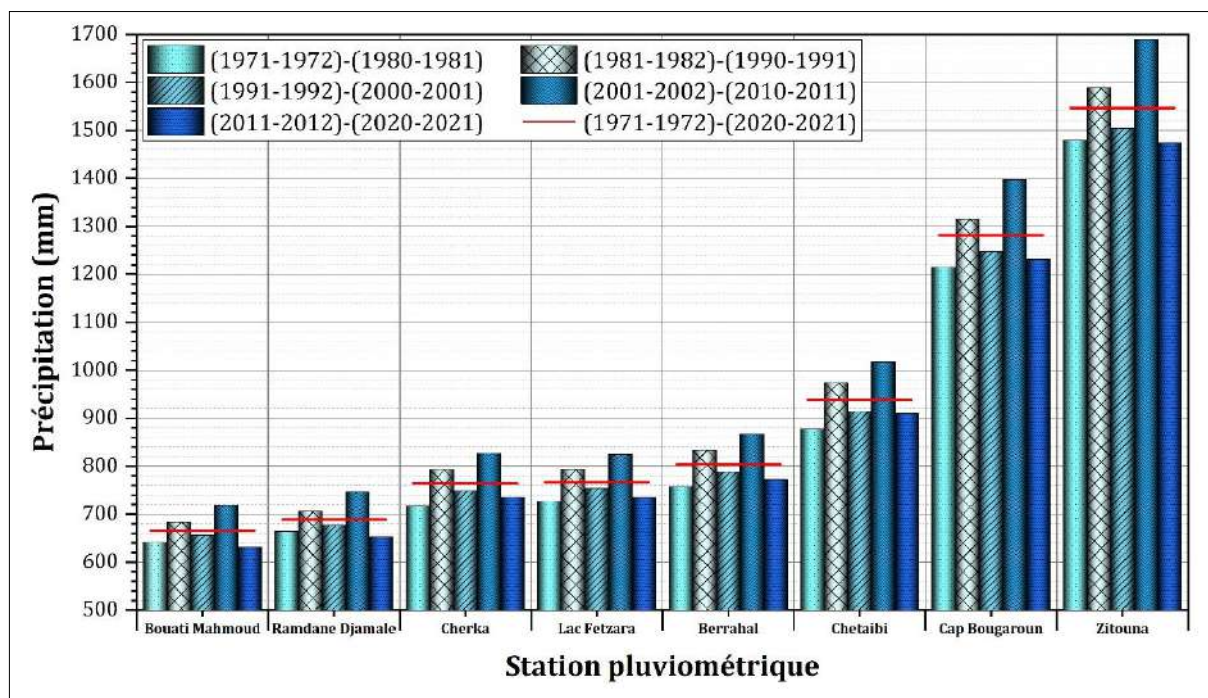


Figure 35 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin des Côtiers constantinois-Centre

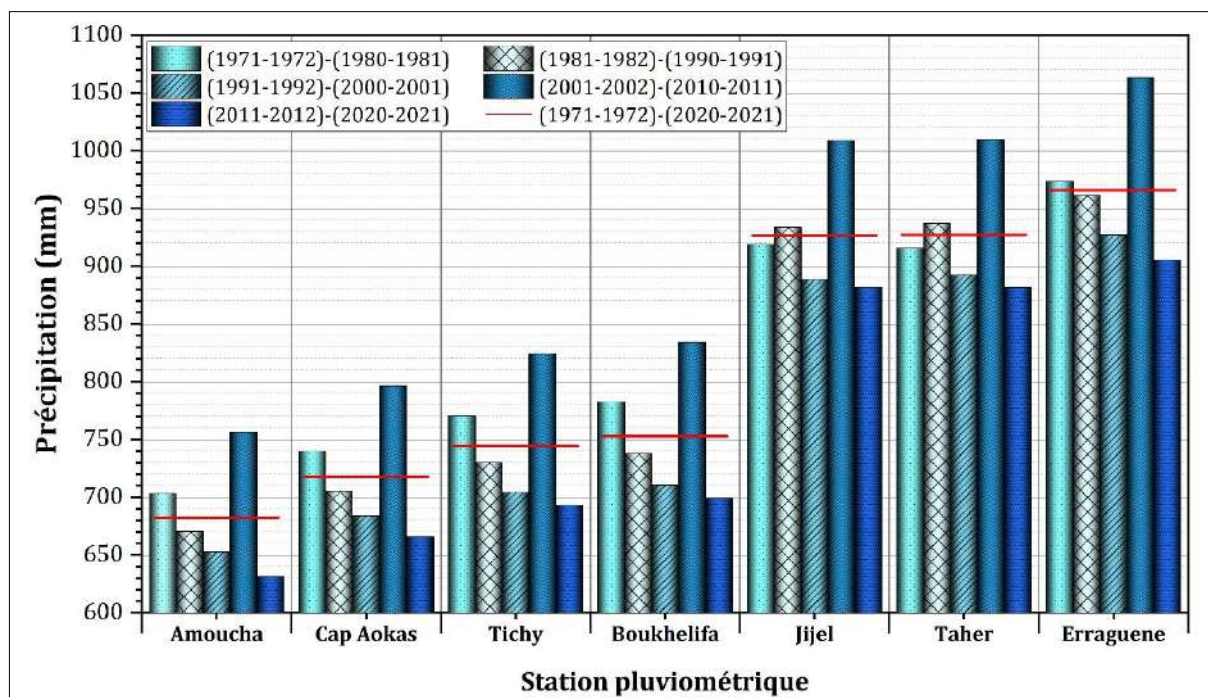


Figure 36 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin des Côtiers constantinois-Ouest

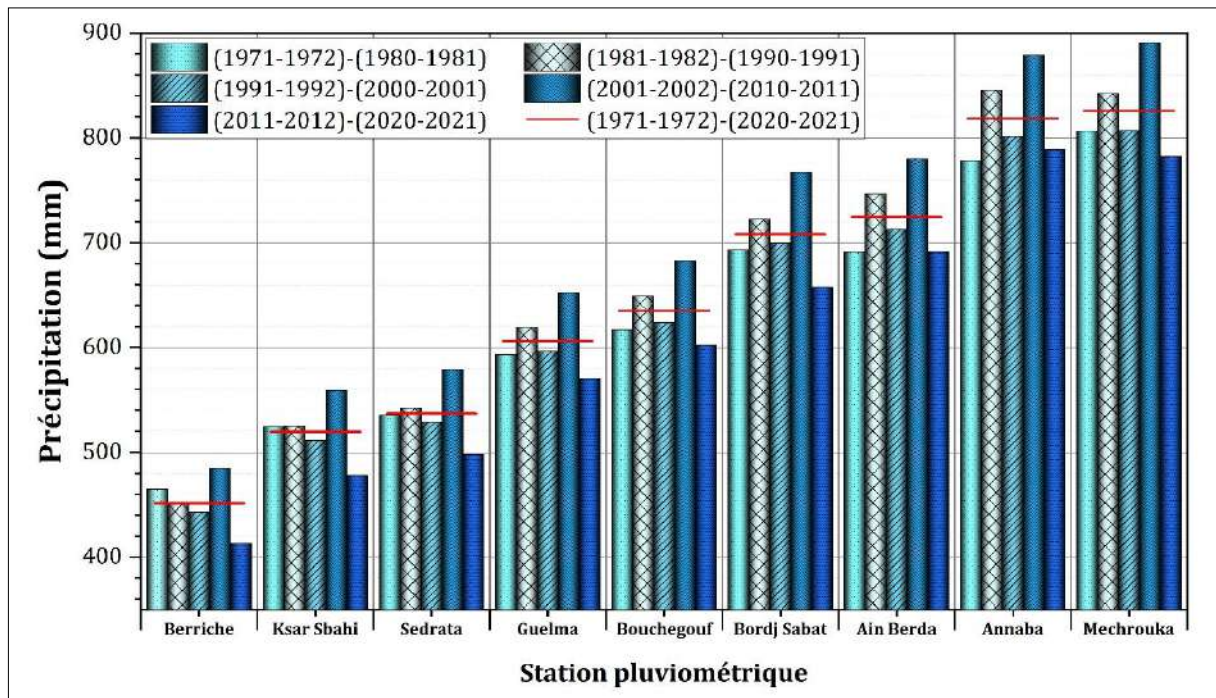


Figure 37 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin de la Seybouse

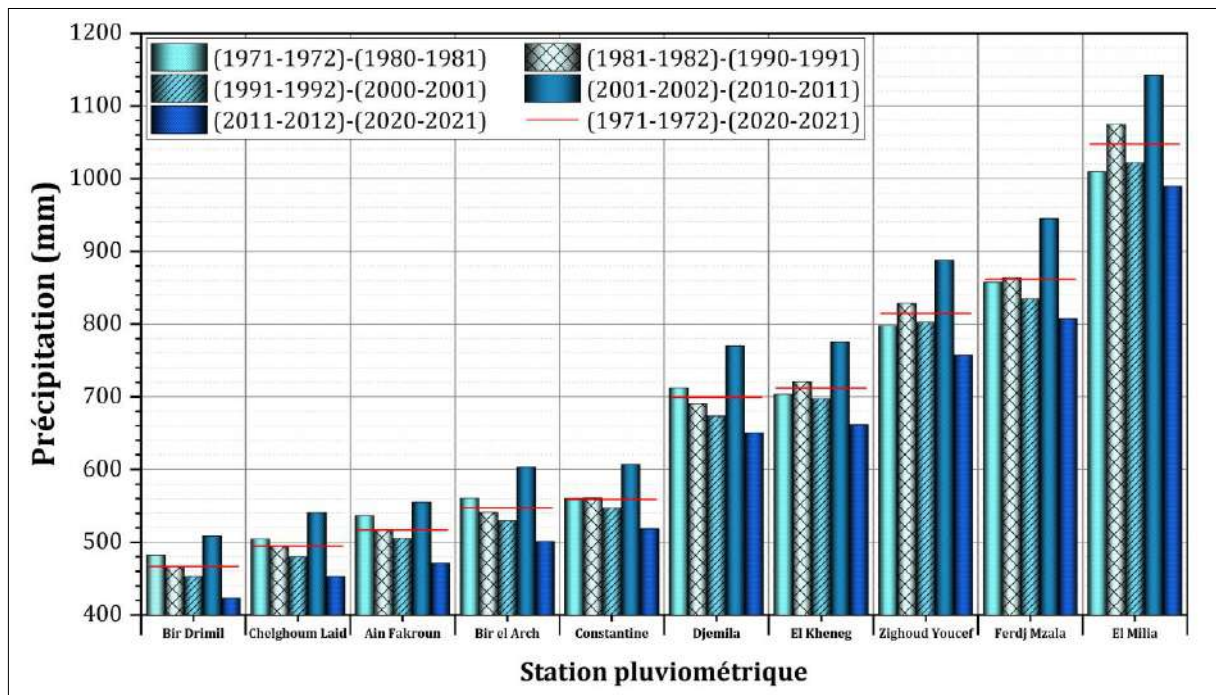


Figure 38 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin du Kebir-Rhumel

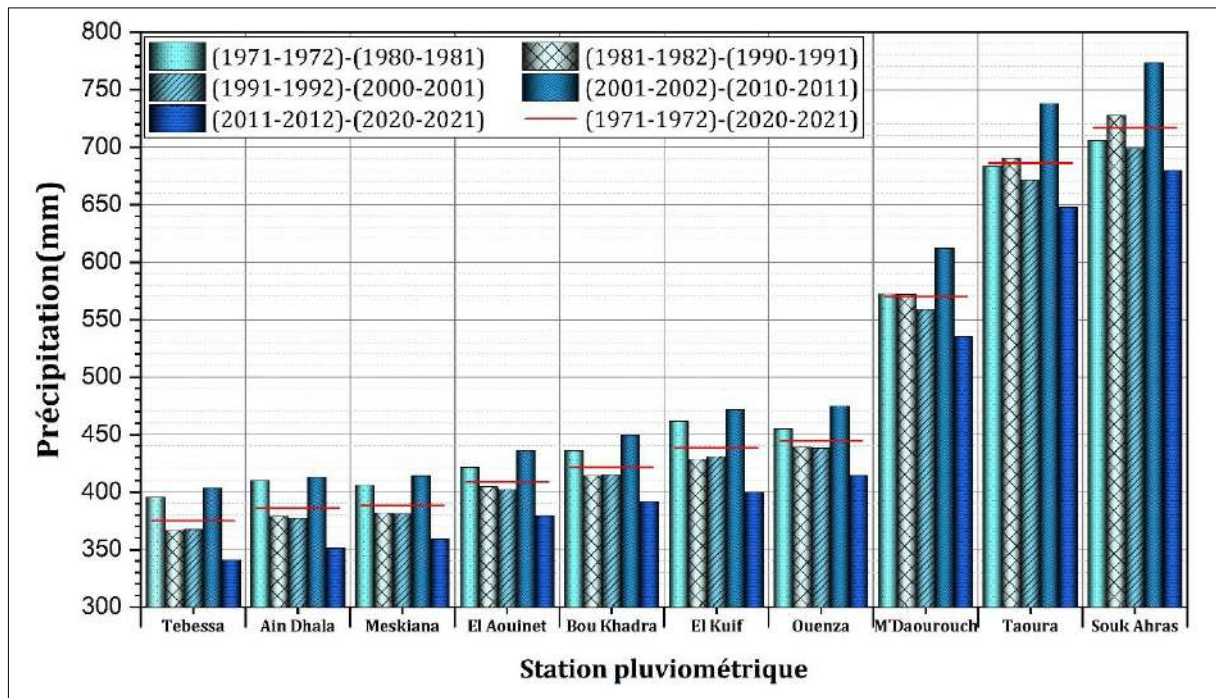


Figure 39 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin de la Medjerda

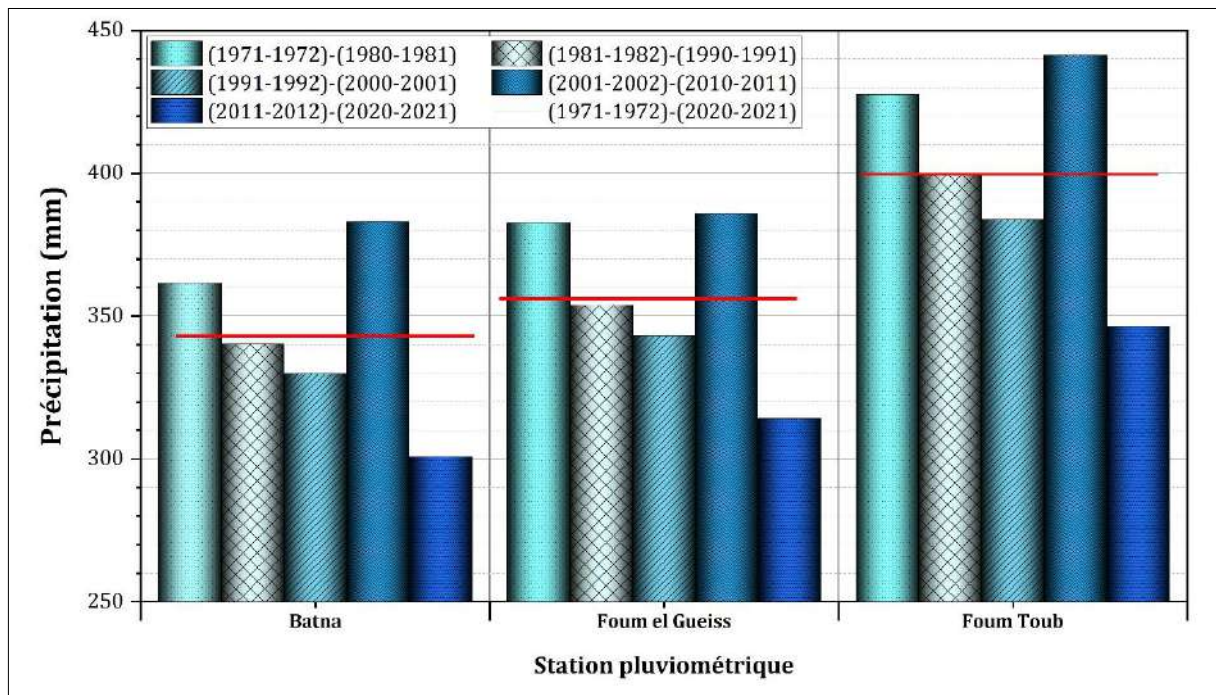


Figure 40 : Histogramme des précipitations annuelles de 1981 à 2021 pour le bassin des Hauts Plateaux

Les histogrammes ci-dessus, établie à partir des séries chronologiques divisées en décennies et couvrant la période 1971/1972-2020/2021, fait bien ressortir les traits essentiels de la répartition des précipitations dans la région d'étude :



Pour le bassin des Côtiers constantinois-Est, Côtiers constantinois-Centre et Seybouse, les décennies 1981-1991 et 2001-2011 sont globalement humides (supérieur à la moyennes), alors que les décennies 1971-1981, 1991-2001 et 2011-2021 sont déficitaires (inférieure à la moyennes). Pour le bassin des Côtiers constantinois-Ouest, Kebir-Rhumel, Medjerda et Hauts Plateaux les décennies 1971-1981 et 2001-2011 sont globalement humides (supérieur à la moyennes), alors que les décennies 1981-1991, 1991-2001 et 2011-2021 sont déficitaires (inférieure à la moyennes), la période 1971-1981 étant la plus sèche.

**2.2. Coefficient pluviométrique (H)**

Le coefficient pluviométrique permet de déterminer, pour une station donnée, les années excédentaires et les années déficitaires. C’est un paramètre climatique très important, calculé par le rapport de la pluviométrie de l’année considérée sur la pluviométrie moyenne annuelle observée à une station donnée, selon la relation suivante :

$$H = \frac{P_i}{P_{moy}}$$

Avec :

H : coefficient pluviométrique

P<sub>i</sub> : Pluviométrie annuelle de l’année (mm).

P<sub>moy</sub> : Pluviométrie moyenne annuelle (mm).

L’année est excédentaire si H > 1, et si H < 1, l’année correspondante est déficitaire.

les figures ci-dessous représentent les résultats du coefficient pluviométrique obtenues sur une période allant de 1971/1972 à 2020/2021 soit 50 ans.

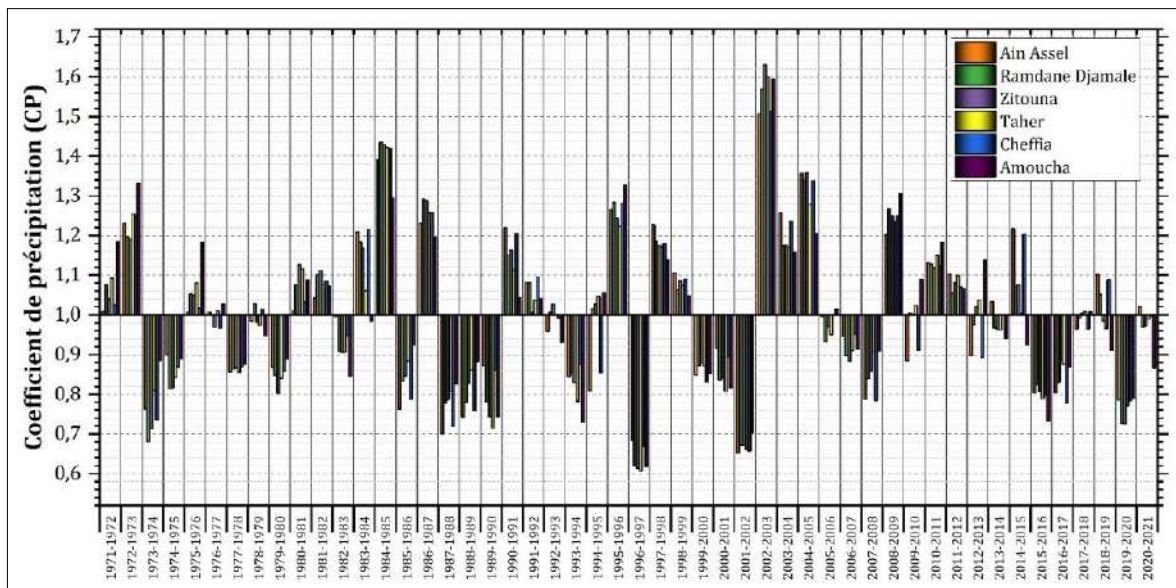


Figure 41: Histogramme du coefficient pluviométrique pour le bassin des Côtiers constantinois

Pour le bassin des Côtiers constantinois (figure 41), les résultats du coefficient pluviométrique montre que dans la station de Ain Assel et Amoucha, il y a 24 années excédentaires et 26 années déficitaires, pour la station de Taher 26 années excédentaires et 24 années déficitaires, pour la station de Taher 26 années excédentaires et 24 années déficitaires, pour la station de Cheffia 22 années excédentaires et 28 années déficitaires et pour la station de Ramdane Djamale et Zitouna 25 années excédentaires et 25 années déficitaires.

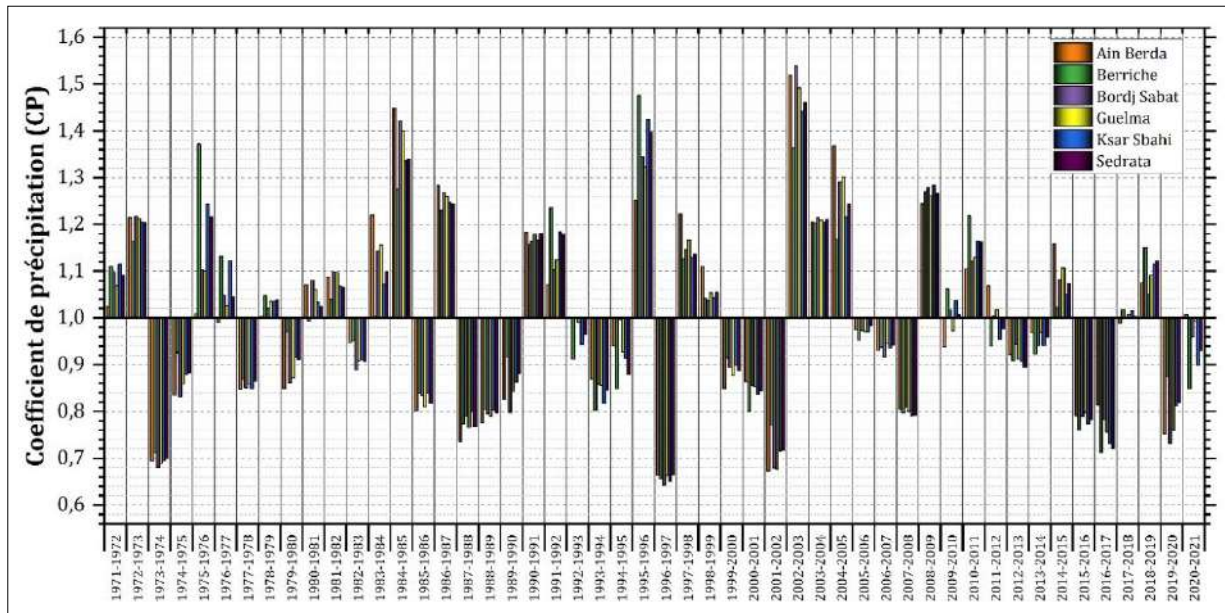


Figure 42 : Histogramme du coefficient pluviométrique pour le bassin de la Seybouse

L'analyse des variations du coefficient pluviométrique (figure 42), montre que le nombre des années déficitaires est presque identique aux années excédentaires. Les années excédentaires sont : 1971-1972; 1972-1973; 1975-1976; 1976-1977; 1978-1979; 1980-198 ; 1981-1982; 1983-1984; 1984-1985; 1986-1987; 1990-1991; 1991-1992; 1995-1996; 1997-1998; 1998-1999; 2002-2003; 2003-2004; 2004-2005; 2008-2009; 2010-2011; 2011-2012; 2014-2015; 2017-2018; 2018-2019 le reste des années sont des années déficitaires.

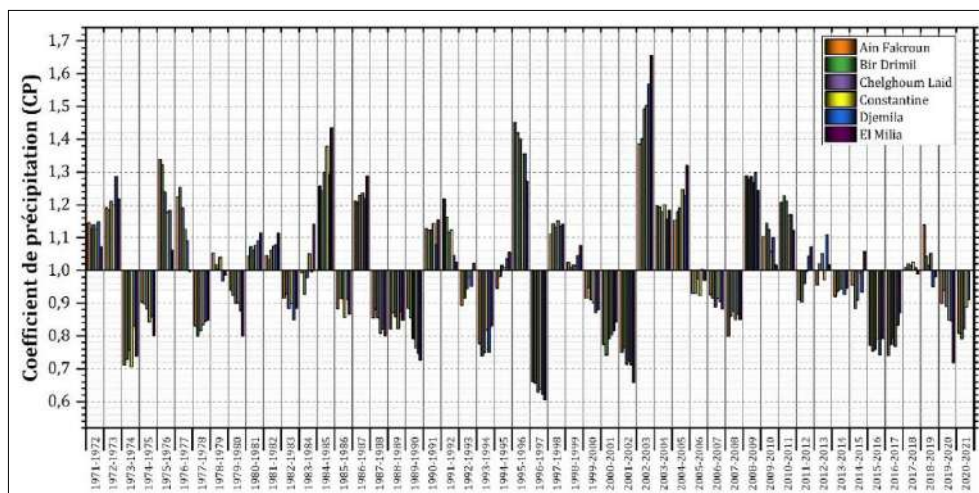


Figure 43 : Histogramme du coefficient pluviométrique pour le bassin du Kebir-Rhumel

L'étude de l'évolution interannuelle des six stations pour le bassin Kebir-Rhumel, a mis en évidence 29 années déficitaires à la station de Bir Drimil, 26 années déficitaires à la station de Chelghoum Laid, Constantine et Djemila, 28 années déficitaires à la station de Ain Fakroun et 25 années à celle d'El Mila (figure 43).

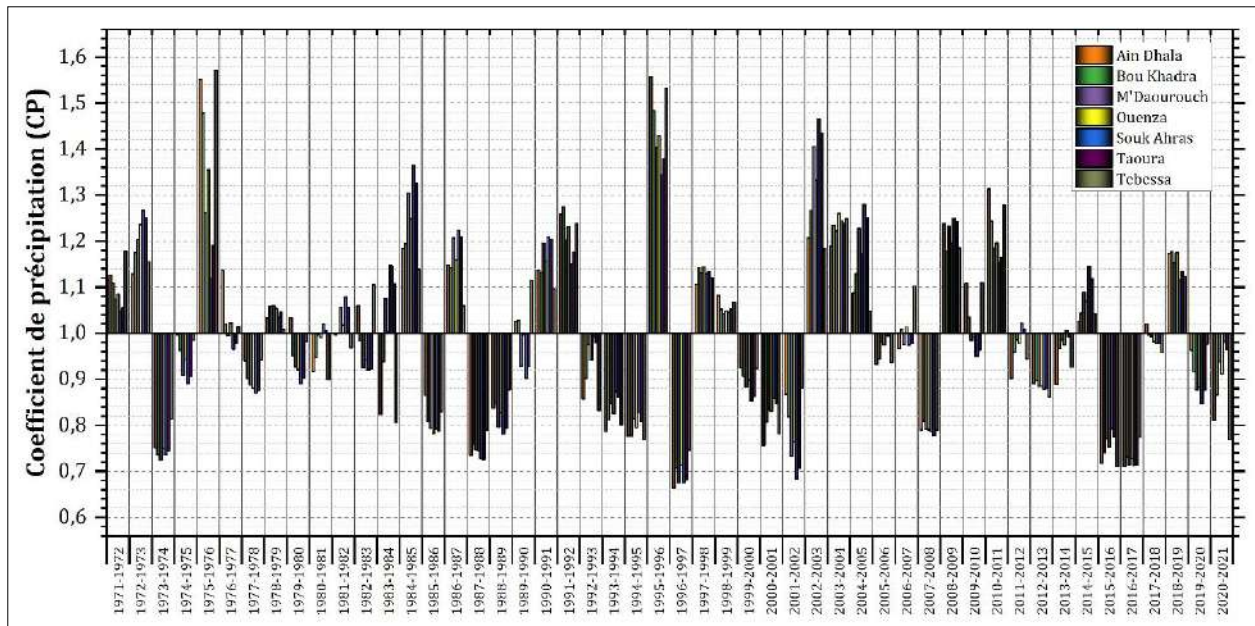


Figure 44 : Histogramme du coefficient pluviométrique pour le bassin de la Medjerda

Pour le bassin de Medjerda les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues montrent une alternance entre les années excédentaires et les années déficitaires. Cette évolution est indiquée par la figure 44 et qui met en évidence les différentes années excédentaires et les années déficitaires au niveau des sept stations (Ain Dhala, Bou Khadra, M'Daourouch, Ouenza, Souk Ahras, Taoura et Tebessa).

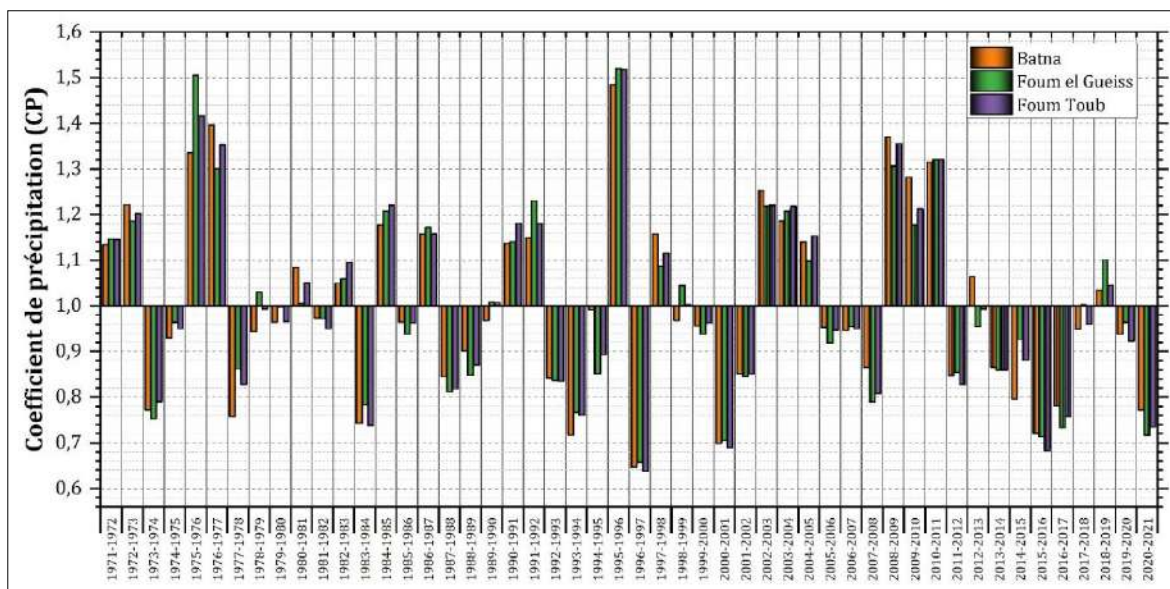


Figure 45 : Histogramme du coefficient pluviométrique pour le bassin des Hauts Plateaux

L'étude de l'évolution interannuelle des précipitations des trois stations du bassin versant des Hauts Plateaux pour la période indiquée, a mis en évidence 30 années déficitaires à la station de Batna, 29 années à Foug Toub et 27 années à Foug el Gueiss.

### 3. Répartition saisonnière des précipitations

L'interprétation des données pluviométriques selon une répartition saisonnière est faite suivant les saisons agricoles (Automne : Septembre, Octobre et Novembre, Hiver : Décembre, Janvier et Février, Printemps : Mars, Avril et Mai, Eté : Juin, Juillet et Aout).

La figure ci-dessous montre la répartition saisonnière des précipitations :

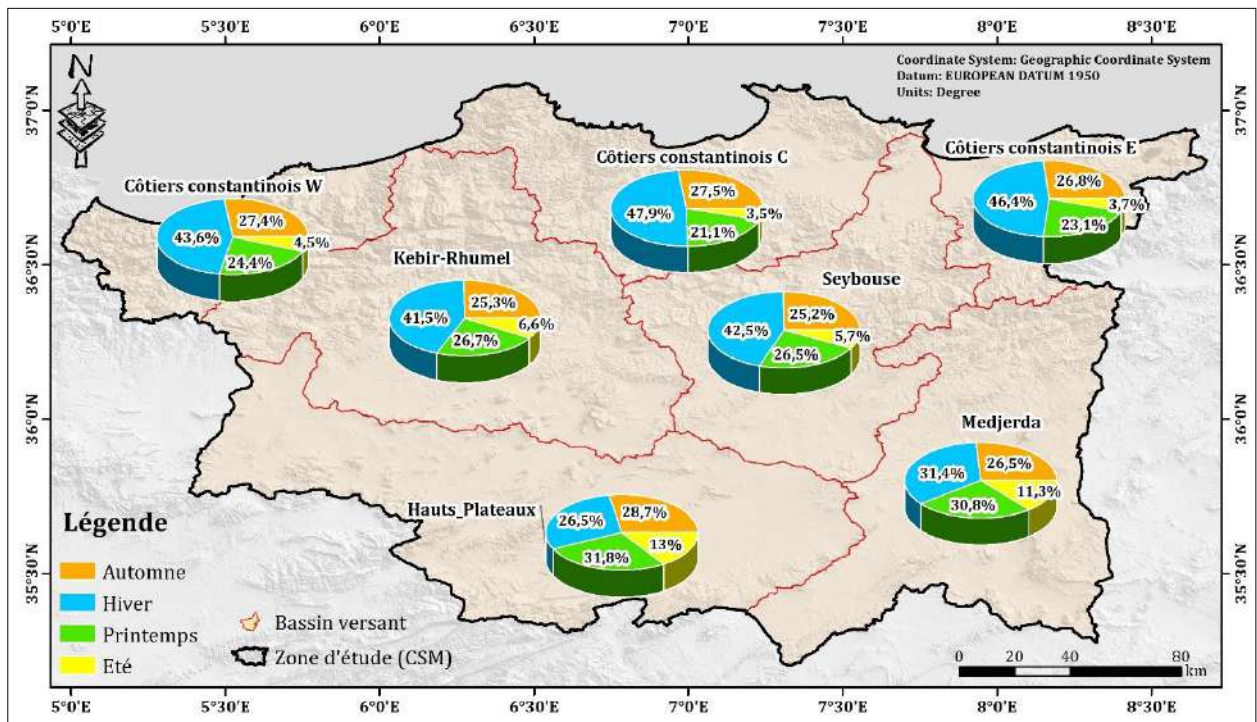


Figure 46 : Carte de la répartition saisonnière des pluies

Pour la partie nord, représentée par le bassin des Côtiers constantinois, la distribution saisonnière des précipitations nous montre que l'hiver est la saison la plus pluvieuse, avec des variations entre 43,6% et 47,9% des précipitations annuelles moyennes. L'automne et le printemps sont deux saisons presque similaires, avec des pourcentages compris entre 26,8 et 27,5 et 21,1-24,4 %, respectivement. La saison la moins pluvieuse est l'été, lorsque les précipitations atteignent au moins 3,5 %.

Pour la partie centre, représentée par le bassin de Seybouse, Medjerda et Kebir Rhumel, les pluies hivernales sont toujours les plus abondantes, varient de 31,4% à 42,5 % du total annuel des précipitation. On remarque également que les pluies printanières sont supérieures aux pluies automnales.

Pour la partie sud représentée par le bassin d'Hauts plateaux, les pluies automnales sont supérieures aux pluies hivernales, et inversement pour les bassins versants situés au nord et centre de la région (Côtiers constantinois, Seybouse, Medjerda, Kebir-Rhumel).

En résumé, le climat de la région Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) a des saisons distinctes, avec une période humide et fraîche et une période sèche et chaude. Cela correspondrait à un climat méditerranéen semi-humide au nord et à un climat semi-aride au sud.

#### 4. Cartographie des pluviométries moyennes annuelles décennales

Dans le but de cartographier la variabilité spatio-temporelle des précipitations du bassin versant Constantinois-Seybouse-Mellegue, la méthode des isohyètes a été utilisée. Elle consiste à tracer les courbes d'égaux hauteurs de précipitations (isohyètes) de tous les points de la zone d'étude à un intervalle de temps donné. Dans la région Constantinois-Seybouse-Mellegue, les cartes d'isohyètes sont réalisées par une interpolation des valeurs moyennes annuelles de la pluviométrie de chaque station météorologique selon la technique du krigeage, à l'aide du logiciel ArcGis 10.3. Les périodes retenues sont les décennies 1971-1981, 1981-1991, 1991-2001, 2001-2011 et 2011-2021. les isohyètes sont définies selon un pas de 100 mm.

La pluviométrie annuelle a varié de façon notable au cours des cinq dernières décennies, depuis la décennie 1981-1991 jusqu'à la décennie 2011-2021. Les figures 47, 48, 49, 50, 51 et 52 ci-dessous représentent les distributions spatiales des précipitations moyennes annuelles et l'évolution des classes délimitées par les courbes isohyètes.

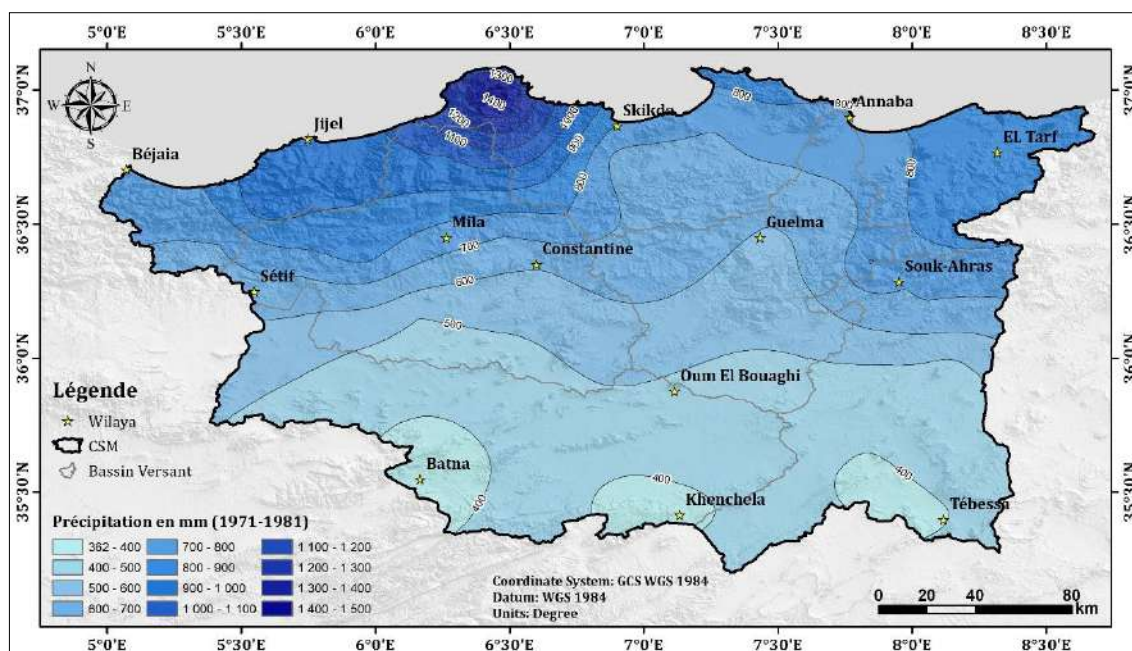


Figure 47 : Hauteurs pluviométriques moyenne interannuelle au cours de la décennie 1971-1981

La figure 47, représente la distribution spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle au cours de la décennie 1971-1981. Au Nord, la zone la plus arrosée où la précipitation est de l'ordre de 1478,7

mm à Zitouna. Les précipitations diminuent du Nord vers le Sud (777,8 mm à Annaba, 616,7 à Bouchegouf, 524,4 à Ksar Sbahi, 409,9 à Ain Dhala et 361,6 mm à Btina). Les lois de l'éloignement de la mer, l'orographie et l'exposition des versants aux vents humides justifient les variations pluviométriques d'une zone à l'autre de la région d'étude (Bechiri, 2011).

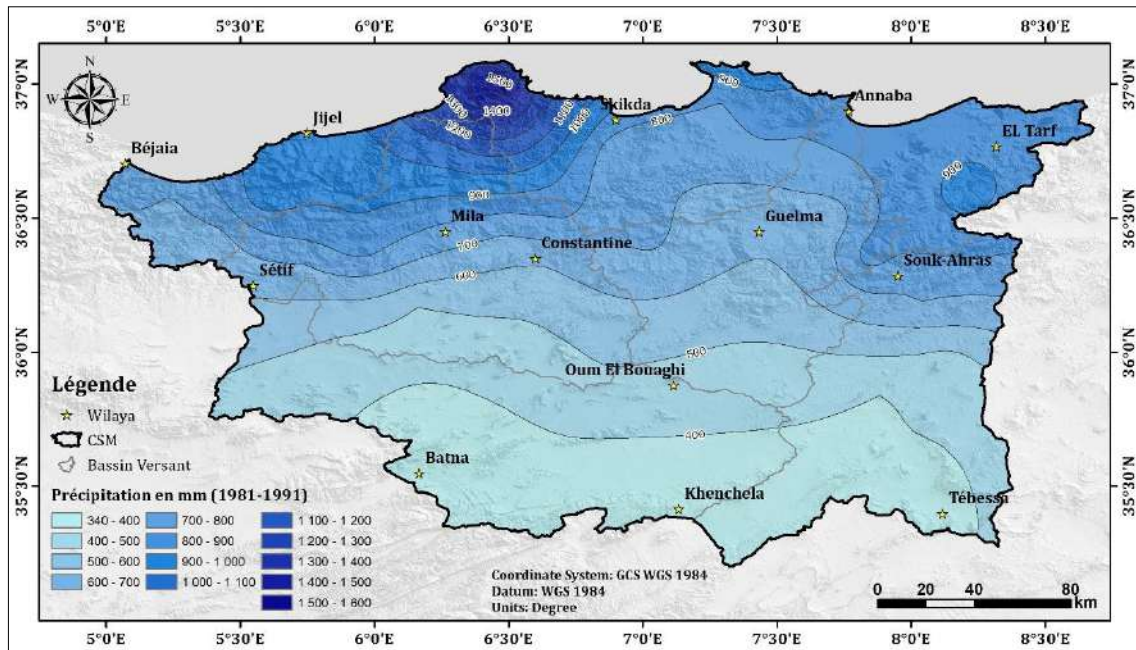


Figure 48 : Hauteurs pluviométriques moyenne interannuelle au cours de la décennie 1981-1991

La décennie 1981-1991 (figure 48) représente une légère augmentation des quantités de pluies annuelles observée aux stations du bassin des Côtiers constantinois et à l'extrême nord du bassin des Côtiers constantinois-Centre, matérialisée par l'apparition de l'isohyète 1500 mm. Les stations situées à l'est du bassin, en l'occurrence celles de Ain Kerma et Cheffia, enregistrent une augmentation pour atteindre 900 mm comparativement à la décennie précédente. Cependant, certaines stations enregistrent une diminution, en l'occurrence celles de Meskiana et de Ain Dhala, représentées par l'isohyète 400 mm.

Au cours de la décennie 1991-2001 (figure 49), la baisse de la pluviométrie prend une importance particulière sur le bassin versant des Côtiers constantinois-Est. Cette diminution affecte la quasi-totalité des stations. Les pluviométries les plus faibles (330 mm à 400 mm) sont enregistrées dans le bassin des Haut plateaux, puis au sud-est à la station de Tebessa où la pluviométrie est de 367 mm. Sur tout le reste du bassin, la pluviométrie fluctue entre 500 mm et 1500 mm.

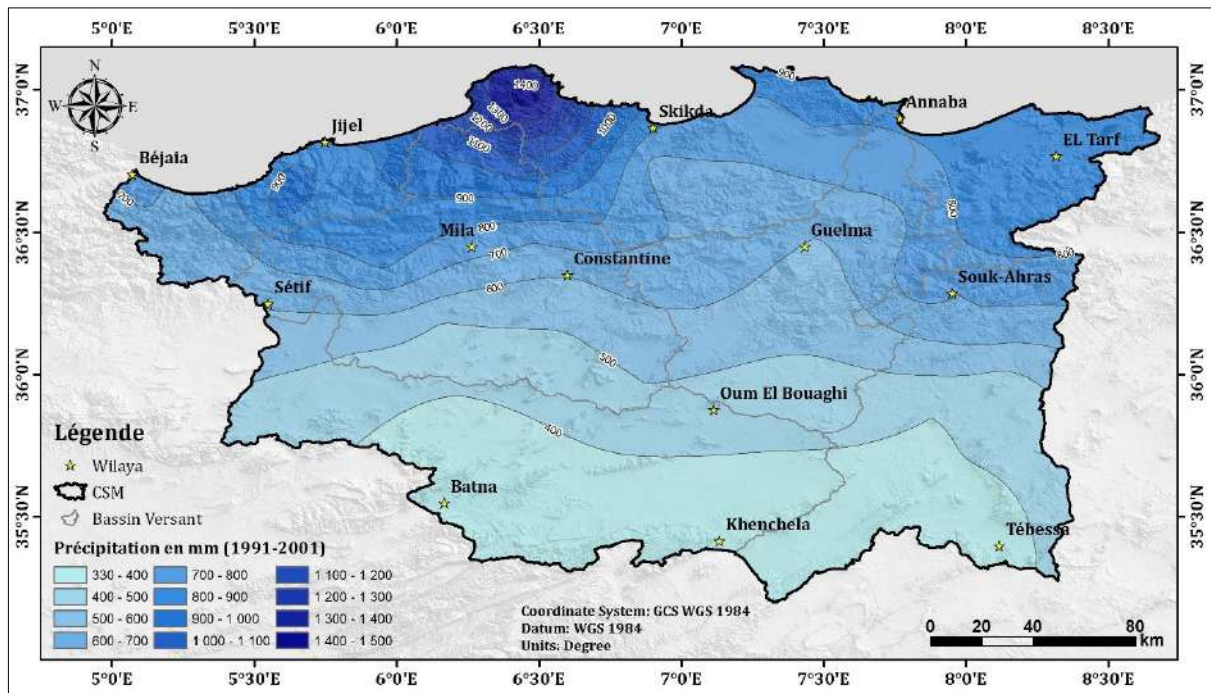


Figure 49 : Hauteurs pluviométriques moyenne interannuelle au cours au cours de la décennie 1991-2001

La décennie 2001-2011 est assez pluvieuse. La région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) est limité par les courbes isohyètes 400 mm dans les trois stations du bassin des l’Haut plateaux, et 900 à 1500 mm dans les stations du bassin de la Cotier Constantinois. La station de Zitouna enregistre la précipitation la plus élevée, supérieures à 1500 mm, toutes les autres stations du bassin enregistrent des précipitations qui fluctuent entre 500 mm et 900 mm. L’isohyète 300 mm est inexistante sur La région durant cette période.

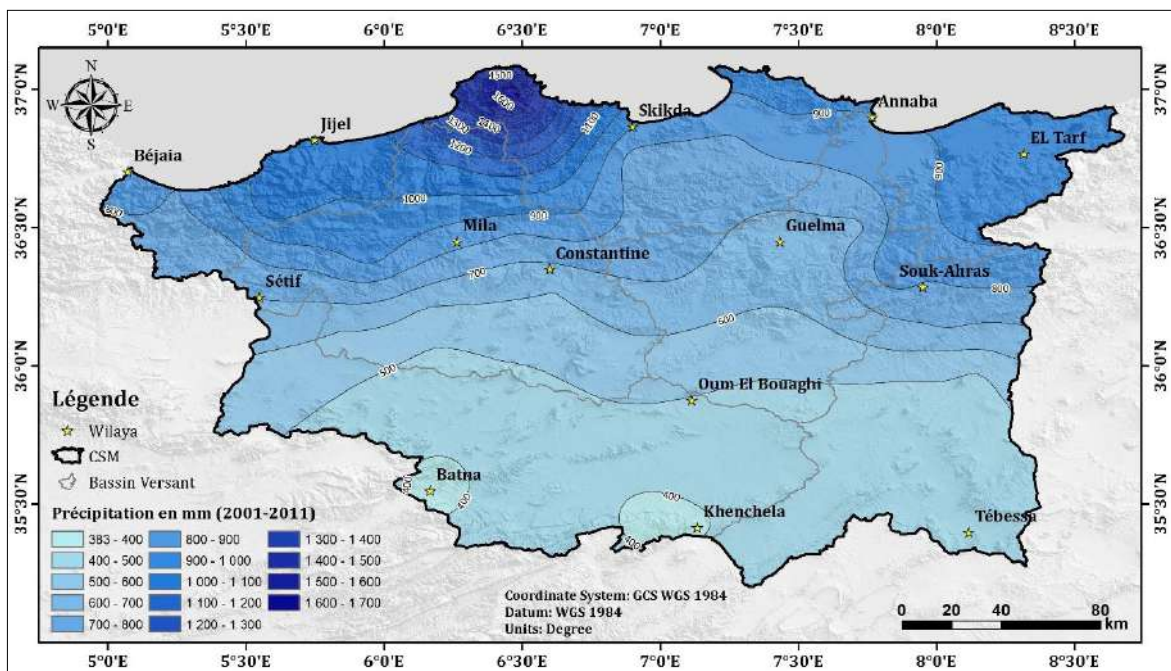


Figure 50 : Hauteurs pluviométriques moyenne interannuelle au cours au cours de la décennie 2001-2011

La figure 51, montre que la distribution spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle de la décennie 2011-2021 est plus faibles que celle des décennies précédentes.

Cette diminution affecte la quasi-totalité des stations. Les pluviométries les plus faibles (300 mm à 400 mm) sont enregistrées dans les hauts-plateaux et les stations situées à l'est du bassin, en l'occurrence celles de Ain Kerma et Cheffia, enregistrent une légère baisse pour atteindre 800 mm comparativement à la décennie précédente. Sur tout le reste du bassin, la pluviométrie fluctue entre 500 mm et 1400 mm.

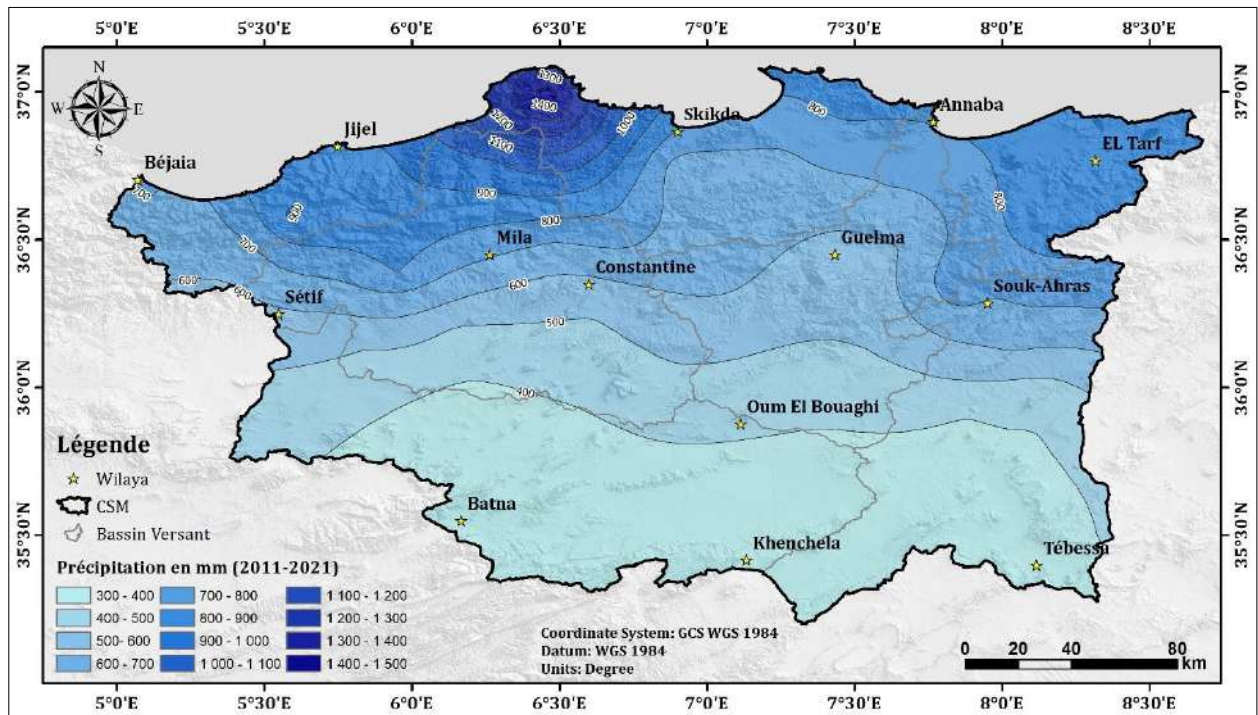


Figure 51 : Hauteurs pluviométriques moyenne interannuelle au cours au cours de la décennie 2011-2021

### 5. Cartographie de la pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1971-2021

Les hauteurs pluviométriques moyennes annuelles (1971-2021) évoluent de 1400 mm dans la partie nord (Zitouna, Cap Bougaroun) du bassin vers 400 mm au sud (Ain Dhala). Elles atteignent 600 mm à Djemila, dans la partie nord-ouest du bassin. L'analyse des valeurs moyennes annuelles révèle une inégalité dans la distribution spatiale de la pluviométrie sur le bassin versant de la Constantinois Seybouse Mellegue (figure 52). Les hauteurs annuelles de pluie décroissent du nord vers le sud, et de l'est vers le nord-ouest du bassin versant de la Constantinois Seybouse Mellegue.



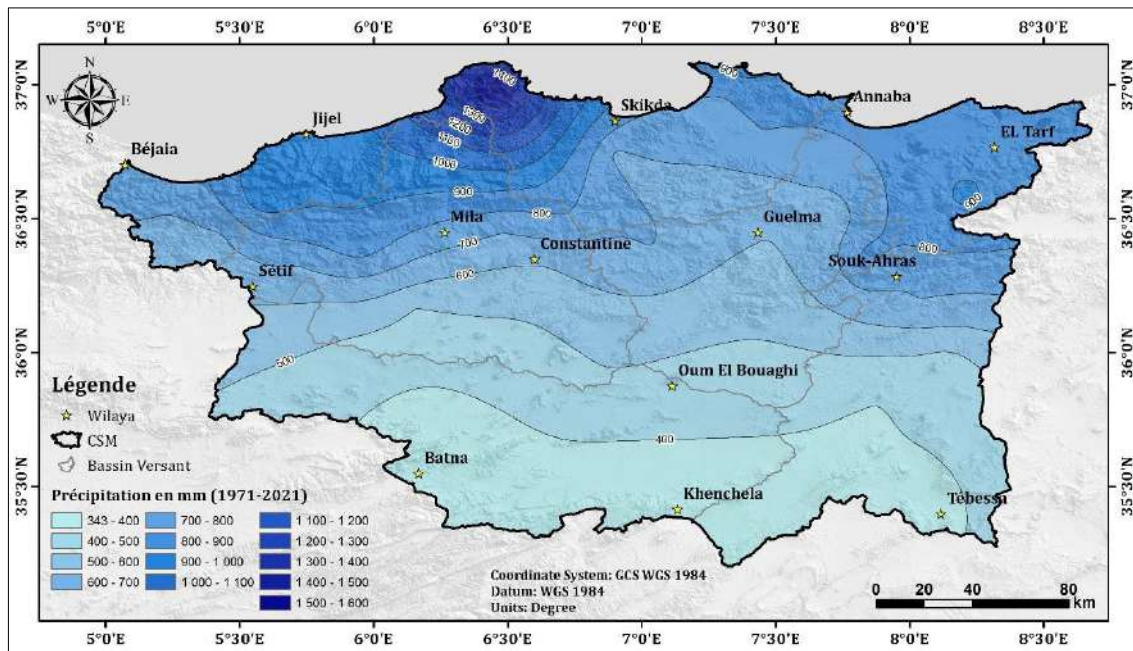


Figure 52 : Hauteur pluviométrique moyenne annuelle de 1971 à 2021

## 6. Conclusion

L'étude de la variabilité spatiotemporelle des pluies réalisée sur une période de 50 ans dans l'ensemble du Nord-Est de l'Algérie, montre une forte hétérogénéité concernant leur répartition spatiale. Elle diminue du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest. L'analyse des variations du coefficient pluviométrique, montre que le nombre des années déficitaires est presque identique au nombre d'années excédentaires.

La pluviométrie annuelle a varié de manière notable au cours des cinq dernières décennies, depuis la décennie 1981-1991 jusqu'à la décennie 2011-2021.



# **Chapitre V**

*Analyse et cartographie des indices de  
sécheresse*



## Chapitre V : Analyse et cartographie des indices de sécheresse

### 1. Introduction

La sécheresse est considérée comme un phénomène climatique caractérisé par une période prolongée de déficit pluviométrique par rapport aux conditions normales (Schneider et al., 2011). Au cours des dernières années, différentes régions du monde ont connu une grave sécheresse. La cartographie de sécheresse mondiale réalisée par (Miyan, 2015) montre que 258 millions de personnes dans le monde ont été touchées par une sécheresse exceptionnelle au cours des 36 derniers mois. La sécheresse est l'une des plus importantes catastrophes naturelles affectant différents secteurs de la société et sur l'environnement, tels que l'agriculture et les ressources en eau, qui sont très répandues (Ben Abdelmalek et al., 2020).

La région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) est située au Nord-est de l'Algérie et renferme une ressource en eau superficielles et souterraines d'une importance capitale pour le développement socio-économique du pays. La population de la zone d'étude atteint plus de 8210468 habitants en 2012. Elle est fortement concentrée dans les agglomérations les plus importantes (chef-lieu de la Wilaya, des daïras et des communes). Dans cet espace, l'eau est liée principalement aux caractéristiques climatiques. Cependant, le manque d'eau semble être une contrainte importante pour le développement du secteur agricole dans le bassin.

Cette étude se propose pour suivre l'évolution spatio-temporelle de la sécheresse météorologique et agricole dans la région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue au nord-est de l'Algérie sur la base des données météorologiques et données de télédétection.

Pour mener à bien notre travail, ce chapitre analyse les différents résultats trouvés et cela en trois parties distinctes :

1. Analyse de la sécheresse basée sur des données météorologiques
2. Analyse de la sécheresse basée sur des données de télédétection
3. La comparaison entre l'indice SPI et VHI ;

## 2. Analyse de la sécheresse basée sur des données météorologiques

Dans le but de caractériser la sécheresse, on s'est basé sur le calcul des différents indices de sécheresse qui contrôlent ce phénomène et prévoient sa tendance. De nombreuses méthodes et indices sont utilisés pour surveiller les épisodes de sécheresse. Par exemple, les méthodes météorologiques sont très populaires, utilisant des variables climatiques telles que la précipitation moyenne et la température. Cependant, ces indices incluent l'indice de précipitation standardisé (SPI) (McKee et al., 1993), l'indice d'évapotranspiration de précipitation standardisé (SPEI) (Vicente Serrano et al., 2010 ; Lorenzo-Lacruz et al., 2010), l'indice de gravité de sécheresse de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965) et l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) (Tsakiris et al., 2007).

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

L'indice de précipitations standardisé (SPI) est l'un des indices qui ont été présentés pour la détection et la surveillance de la sécheresse (McKee et al., 1993). Il a été développé par McKee à l'Université de l'Etat du Colorado (Etats-Unis). C'est un indice simple à calculer et le plus largement utilisé pour les études météorologiques de la sécheresse. Il ne nécessite que des données sur les précipitations. L'indice SPI est calculé sur des périodes à court terme (3, 6 et 9 mois) et à long terme (12, 24 et 48 mois). Dans n'importe quelle échelle de temps, chacune reflétant les effets spécifiques de la sécheresse sur différentes ressources en eau.

Pour calculer l'indice SPI, il est suggéré qu'au moins 30 ans de données sur les précipitations soient disponibles (OMM, 2012). De plus, un tableau de classification est utilisé pour identifier l'état normal ainsi que les périodes de sécheresse et d'humidité avec différents niveaux de gravité (tableau 30).

La procédure de calcul de SPI utilisant une distribution gamma à deux paramètres est décrite comme suit :

La fonction de densité de probabilité pour la distribution gamma définie par (Lloyd-Hughes et Saunders 2002 ; Mishra et Desai 2005 ; Yacoub et Tayfur 2017 ) :

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

Avec :

- $X > 0$  : la précipitation
- $\alpha > 0$  : le paramètre de forme
- $\beta > 0$  : le paramètre d'échelle
- $\Gamma(\alpha)$  : la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Il est alors nécessaire d'estimer les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  pour ajuster la loi statistique. Pour cela, un estimateur par maximum de vraisemblance est utilisé en appliquant l'approximation de Thom (1958) :

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{X}}{\hat{\alpha}}$$

Où :

- $\hat{\alpha}$  et  $\hat{\beta}$  sont les estimateurs de  $\alpha$  et  $\beta$
- $\bar{X}$  la moyenne de la série de données de précipitations

Pour  $n$  observations, le paramètre  $A$  est calculé comme suit :

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

Maintenant, l'intégration de la fonction de densité de probabilité concernant  $x$  et l'insertion des estimations de  $\alpha$  et  $\beta$  donnent une expression de la probabilité cumulée  $G(x)$  d'une quantité observée de précipitations se produisant pour un mois et une échelle de temps donnés :

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dt$$

En substituant  $\frac{x}{\hat{\beta}}$  par  $t$ , on obtient la fonction gamma incomplète :

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

Bien que la fonction gamma ne soit pas définie en 0, la probabilité d'avoir une pluviométrie nulle est à prendre en compte, Pour cela, on calcule la probabilité d'une pluviométrie nulle dans l'échantillon :

$$q = P(x = 0) = \frac{n_{x=0}}{n}$$

Où :

- $n_{x=0}$  : le nombre d'individus de valeur nulle dans la série
- $n$  : le nombre d'individus total dans la série

La fonction de répartition devient finalement :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

La probabilité cumulée  $H(x)$  est ensuite transformée en distribution normale standard ( $Z$ ) avec la moyenne de zéro et la variance de un, qui est la valeur de SPI, La conversion approximative fournie par Abramowitz et Stegun (1965) comme alternative :

$$Z = \begin{cases} SPI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ pour } H(x) \leq 0,5 \\ SPI = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \text{ pour } H(x) > 0,5 \end{cases}$$

Où :

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \text{ pour } H(x) \leq 0,5 \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \text{ pour } H(x) > 0,5 \end{cases}$$

Et :

$$c_0 = 2,515517 \quad c_1 = 0,802853 \quad c_2 = 0,010328 \\ d_1 = 1,432788 \quad d_2 = 0,189269 \quad d_3 = 0,001308$$

McKee (1993) utilise la classification indiquée dans le tableau 30 afin de définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI.

Tableau 30 : Classification des sécheresses selon les valeurs de SPI

Valeur SPI	Séquence de sécheresse
2 et plus	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Sévèrement humide
1,0 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à +0,99	Proche de la normal
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
-2 et moins	Extrêmement sèche

## 2.2. Analyse de la sécheresse entre la période 1989-2019 en utilisant l'indice SPI-12

L'indice de précipitations standardisé SPI de 12 mois a été utilisé pour analyser le comportement et la variabilité spatiale de la sécheresse dans les 52 stations pluviométriques de la région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM), sur une période s'étendant de l'année hydrologique 1989-1990 à 2018-2019.

Les résultats cartographiés, montrent l'existence de plusieurs périodes de sécheresse de différents degrés ayant touché l'ensemble de la région, en divisant la période d'étude en décennie.

La décennie de l'année hydrologique 1989-1990 à 1998-1999 (figure 53) montre que l'année hydrologique 1989-1990 a enregistré une sécheresse modérée dans tout le Nord et une sécheresse beaucoup plus sévère à l'Ouest. Après deux années moyennement humides, une sécheresse modérée a commencé de s'installer seulement au Sud en 1992-1993, et elle devenue plus sévère à l'extrême en 1993-1994, en particulier dans le bassin versant de la Medjerda. Depuis lors, la région a été caractérisée par une alternance entre des périodes de sécheresse modérée et des périodes proches de la normale, jusqu'à l'année 1998-1999 où des conditions normales ont été observées dans la majorité de la région.

La décennie de l'année hydrologique 1999-2000 à 2008-2009 (figure 54) montre que la première année de cette décennie a enregistré une sécheresse modérée, principalement concentrée au Nord-est. Ensuite, une sécheresse modérée a commencé à s'installer seulement au Sud en 2000-2001, et elle devenue plus sévère à l'extrême en 2001-2002. C'est la première fois au cours de cette période d'étude que l'on enregistre une sécheresse d'une telle gravité et étendue. Les années suivantes ont été caractérisées par des conditions moyennement humides à proches de la normale, jusqu'à l'année 2008-2009 où des conditions de forte pluviométrie ont été observées dans la majorité de la région.

La décennie de l'année hydrologique 2009-2010 à 2018-2019 (figure 55) a été caractérisée par six premières années présentant des conditions plus ou moins normales jusqu'au 2015-2016, où une sécheresse modérée a touché la partie Sud et elle devenu plus sévère à l'extrême en 2016-2017 dans la majorité de la région.

La période d'étude de 1989 à 2019 a connu au moins deux types de situations météorologiques différentes :

- Des périodes d'humidité pendant les années : 1993-1994, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005, 2008-2009 et 2018-2019 avec un maximum en 2018-2019
- Des périodes de sécheresse en 1989-1990, 1993-1994, 1996-1997, 2001-2002 et 2016-2017

La plus sévère a été celle de 2001-2002 et 2016-2017. Le SPI le plus bas sur une période de 12 mois était de -2,6 (extrêmement sèche) au cours de l'année 2001-2002.

Les résultats obtenus par l'indice de précipitation normalisé indiquent qu'il y'a une réduction de la pluviométrie entre 1993-2002. Les zones les plus exposées à l'effet de la sécheresse sont celles qui sont situées à des altitudes moyennes.

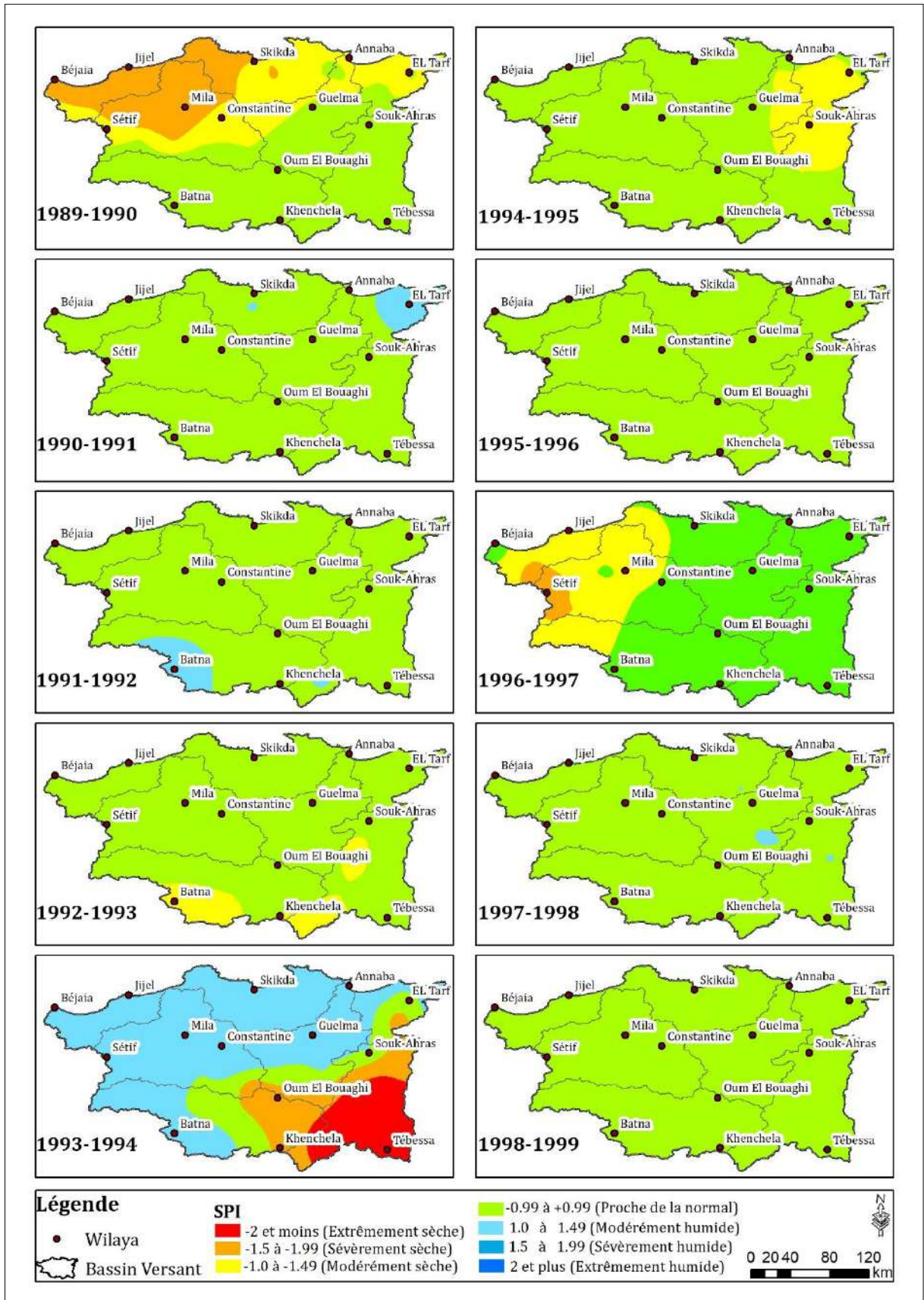


Figure 53 : Variation Spatio-temporelle du SPI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1989-1990 au 1998-1999



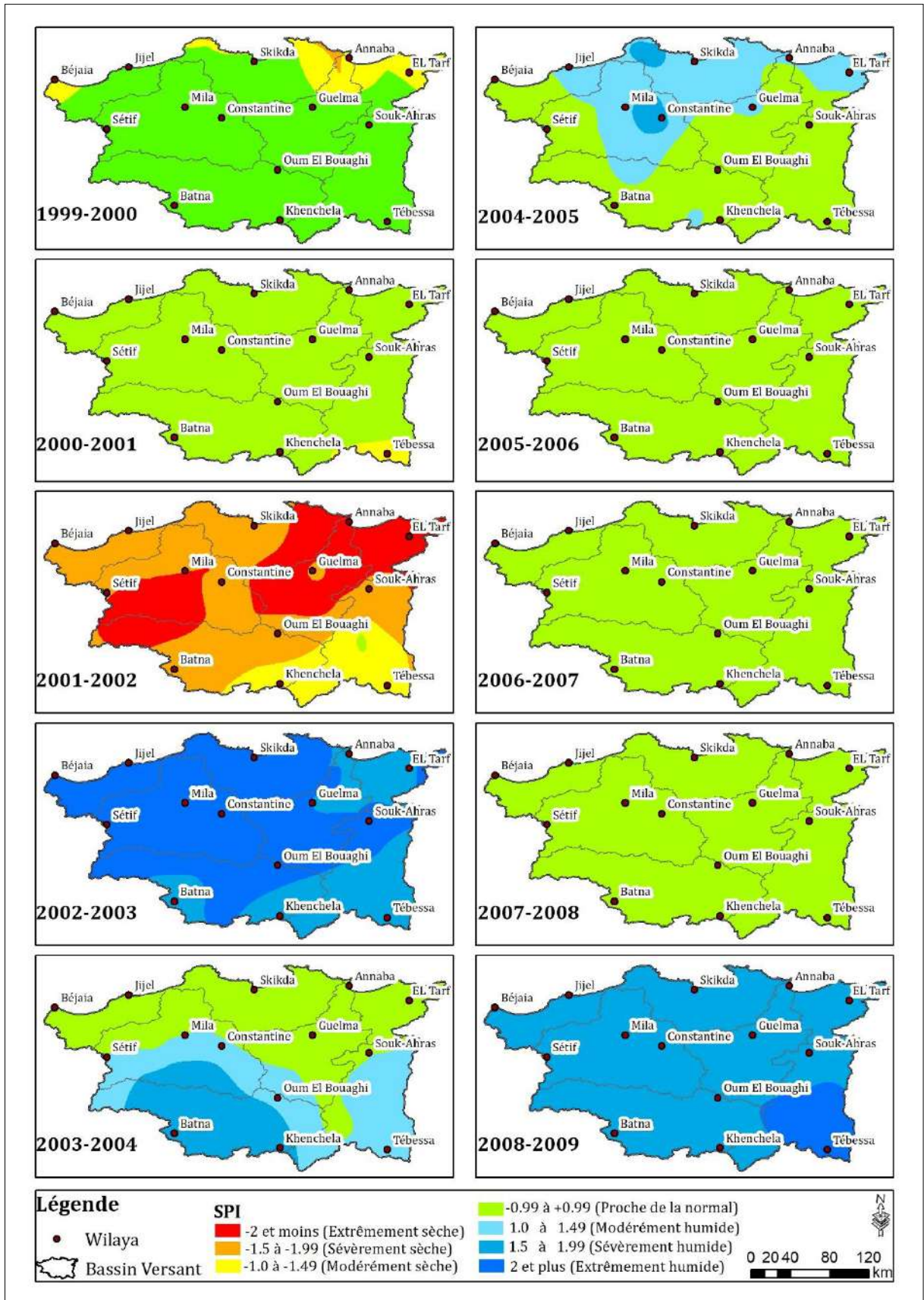


Figure 54 : Variation Spatio-temporelle du SPI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1999-2002 au 2008-2009

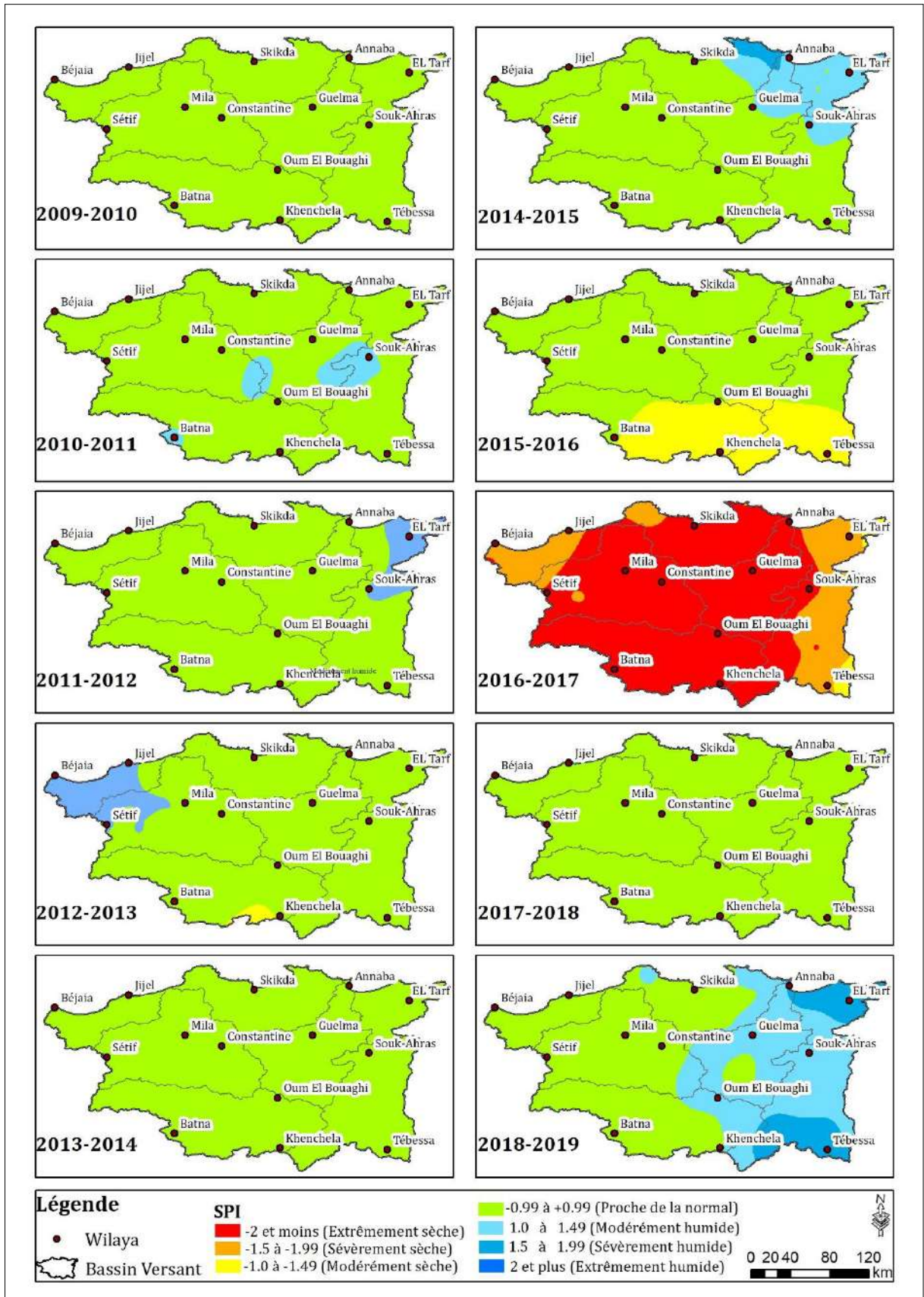


Figure 55 : Variation Spatio-temporelle du SPI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1999-2002 au 2008-2009

### 2.3. Indice de sécheresse de reconnaissance (RDI)

L'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) a été développé par Vangelis (2005) et Tsakiris et al. (2007) à l'Université technique nationale d'Athènes pour traiter plus précisément la pénurie d'eau en tant qu'équilibre entre les entrées et les sorties des systèmes d'approvisionnement en eau. Cette méthode est basée sur le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le ETP est très utile pour l'identification et la détection des épisodes de sécheresse.

L'indice de sécheresse de reconnaissance, RDI, peut être calculé par les équations suivantes. La première expression, la valeur initiale ( $a_k$ ), est présentée sous une forme agrégée au pas de temps mensuel et peut être calculée pour chaque mois de l'année hydrologique ou une année complète, la valeur initiale ( $a_k$ ) est généralement calculé pour la  $i^{\text{ième}}$  année sur une base de temps de  $k$  (mois) comme suit :

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_j^k = 1^{P_{ij}}}{\sum_j^k = 1^{PET_{ij}}}$$

dans laquelle  $P_{ij}$  et  $PET_{ij}$  sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle du  $j^{\text{ième}}$  mois de la  $i^{\text{ième}}$  année et  $k$  est le nombre total d'années des données disponibles.

Les valeurs de  $a_k$  suivent de manière satisfaisante à la fois la distribution lognormale et la distribution gamma dans plusieurs endroits et différentes échelles de temps où elles ont été testées (Tsakiris et al., 2005).

Une deuxième expression, le RDI normalisé, ( $RDI_n$ ) est calculée à l'aide de l'équation suivante pour chaque année :

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

Où :

$\bar{a}_k$ : Moyenne arithmétique de  $k$  values.

La troisième expression, le RDI standardisé ( $RDI_{st}$ ), est calculée selon une procédure similaire à celle utilisée pour le calcul du SPI. L'expression du RDI normalisé est la suivante :

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y}$$

Où :

$y^{(i)}$  : est le  $\ln a_k^{(i)}$

$\bar{y}$  : est sa moyenne arithmétique,

$\hat{\sigma}_y$  : écart-type,

La classification retenue pour l'appréciation du degré de sécheresse selon les valeurs du RDI est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 31 : Classification des sécheresses selon les valeurs de RDI

Valeur RDI	Séquence de sécheresse
2 et plus	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Sévèrement humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à +0.99	Proche de la normal
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
-2 et moins	Extrêmement sèche

#### 2.4. Analyse de la sécheresse entre la période 1989-2019 en utilisant l'indice RDI-12

L'indice de précipitations standardisé SPI n'utilise que des données de précipitations tandis que RDI utilise un rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Les résultats cartographiés par le RDI, montrent également l'existence de plusieurs périodes de sécheresse de différents degrés qui ont touché l'ensemble de la région, en divisant la période d'étude en décennie.

La répartition selon le nombre d'année des épisodes de sécheresse enregistre l'appartenance de la zone étudiée à l'étage climatique semi-aride, avec 8 Années sèches (modérée et forte) et 7 Années humides (fortes et extrêmes), séparées par une 15 années proche de la normal, sur une période d'étude de 30 ans d'observation. Le degré d'exposition à la sécheresse augmente du Nord-est vers le centre du bassin versant.

Dans l'année hydrologique 1993-1994 (figure 56), une sécheresse sévère s'est étendue sur la partie sud de la région et avec encore un degré plus extrême dans la plaine de Tébessa.

un autre épisode de sécheresse sévère a touché la majorité de la région sévère à extrême en 2001-2002 et 2016-2017 ( figure 57 et 58 ).

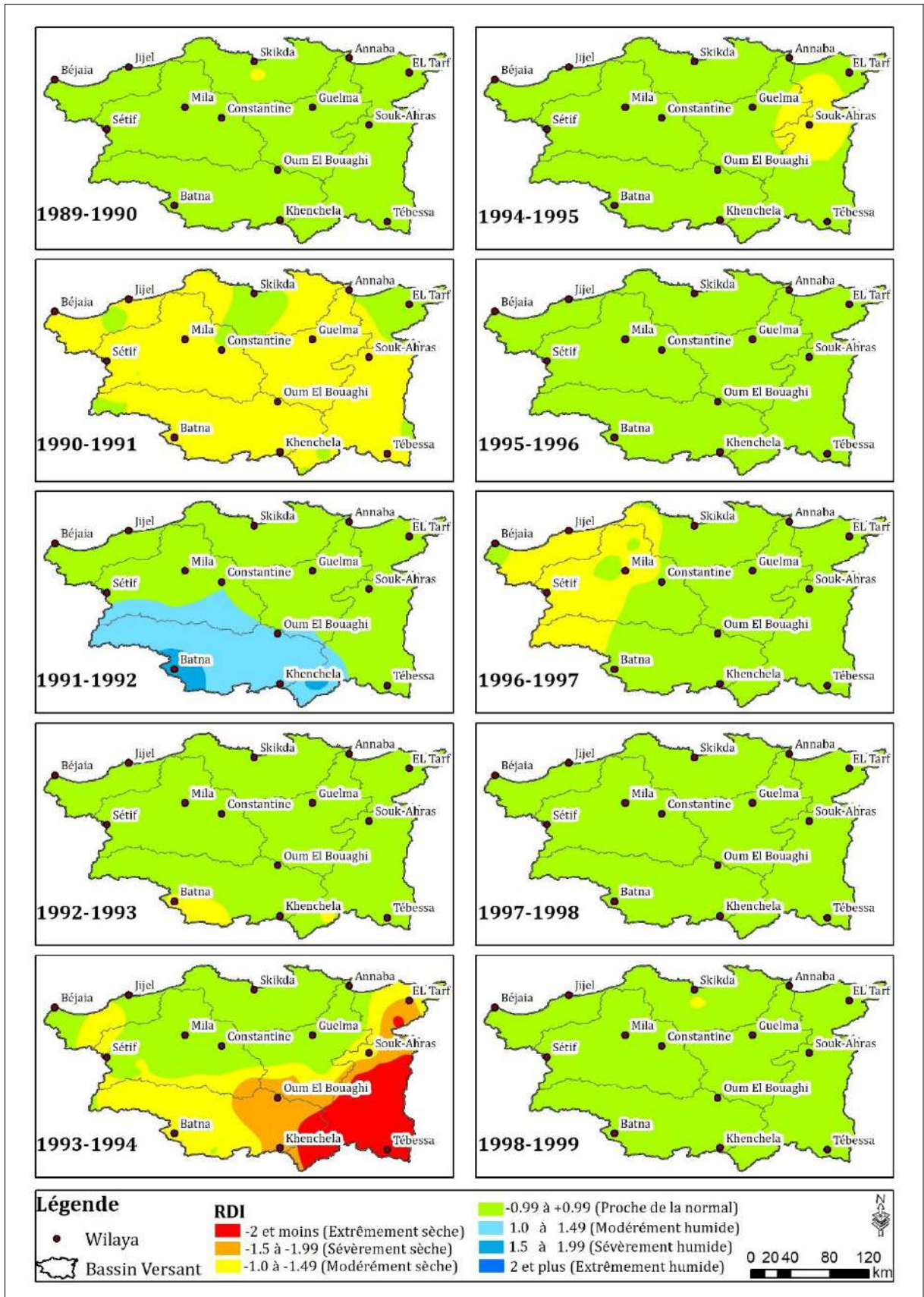


Figure 56 : Variation Spatio-temporelle du RDI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1989-1990 au 1998-1999

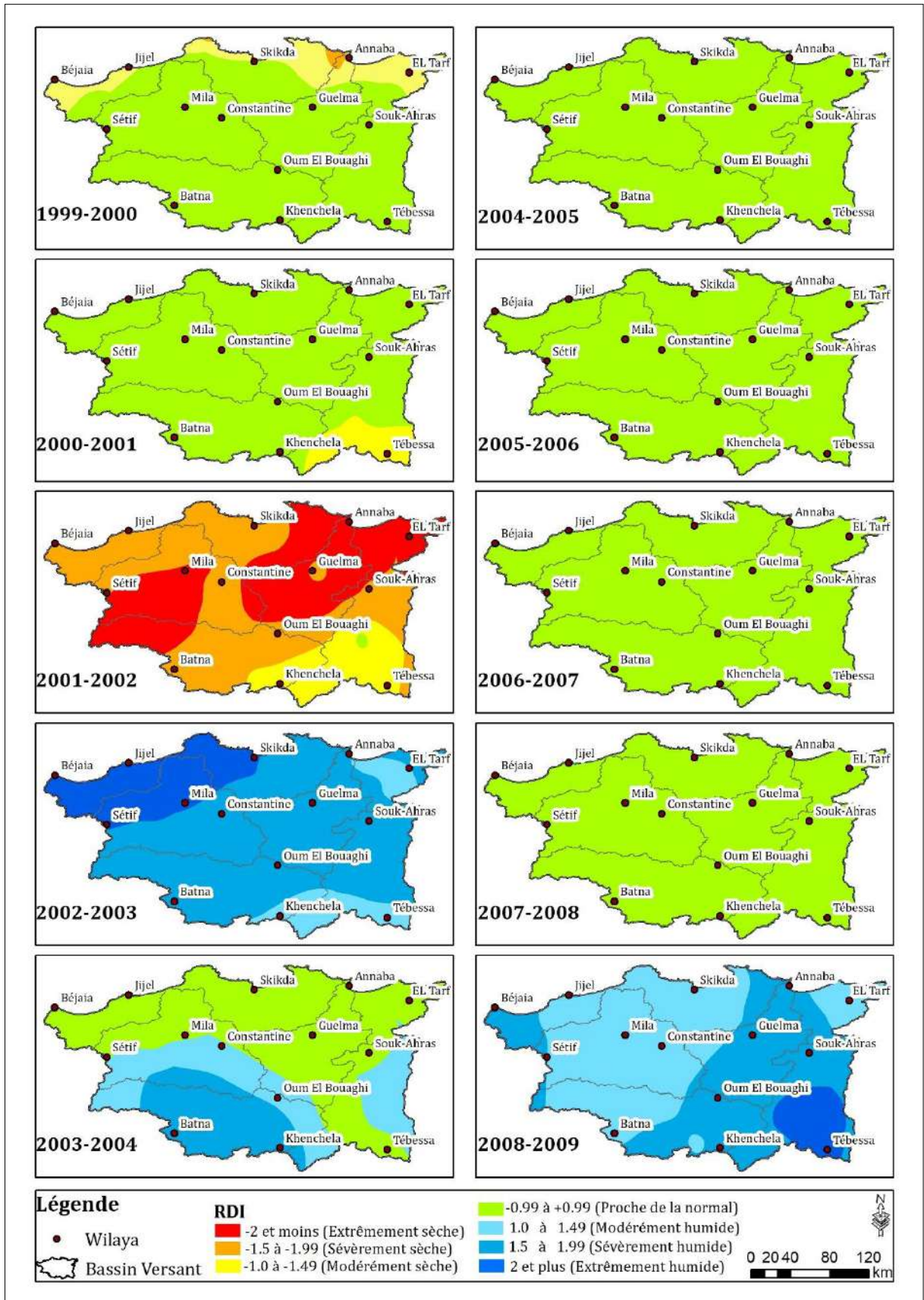


Figure 57 :Variation Spatio-temporelle du RDI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1999-2000 au 2008-2009

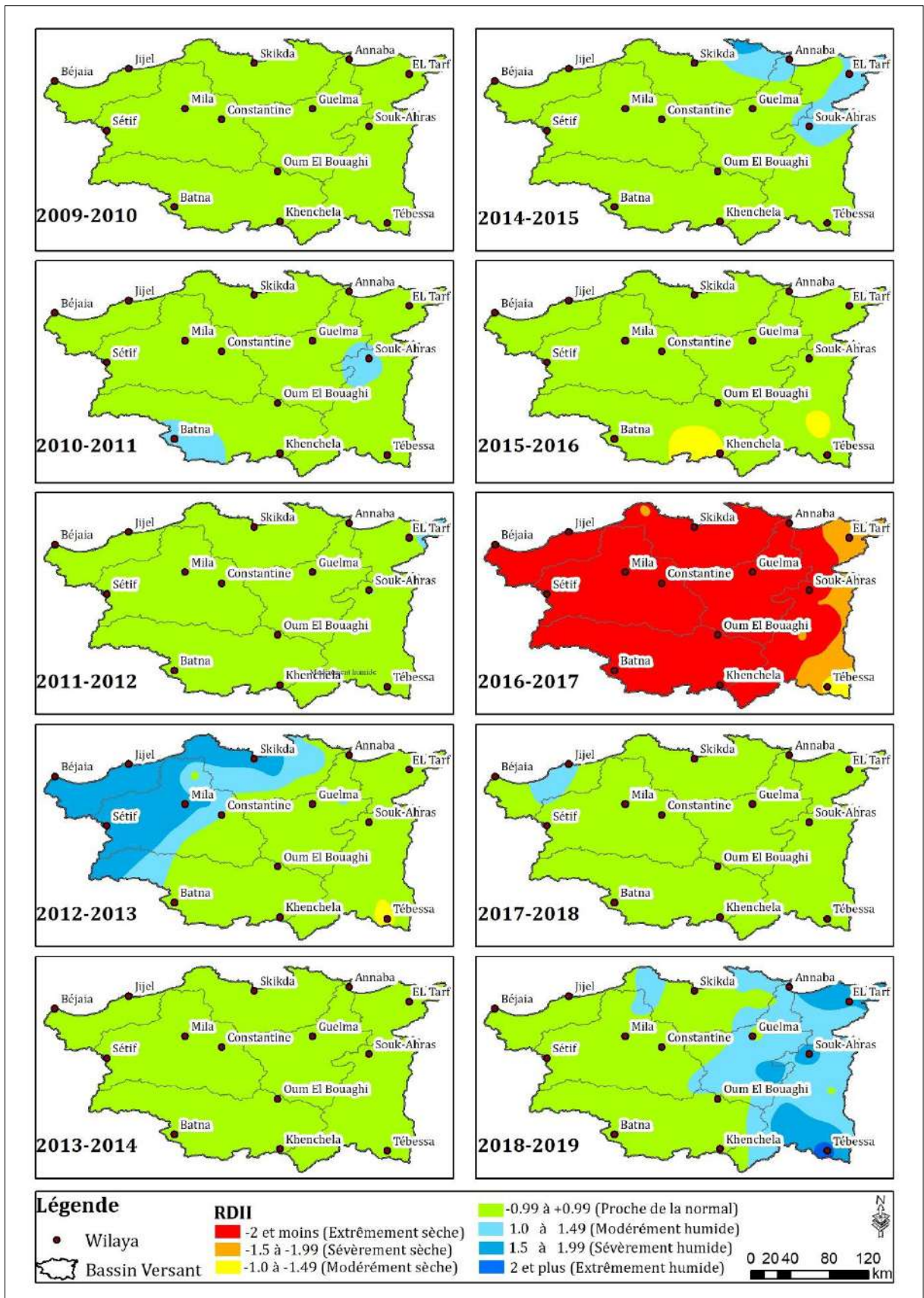


Figure 58 : Variation Spatio-temporelle du RDI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 2009-2010 au 2018-2019

**2.5. la variation temporelle de l'indice standardisé des précipitations (SPI) et de l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI)**

Les graphes suivantes (figure 59) illustrent les séries temporelles des SPI et RDI sur 12 mois, de 1989 à 2019 pour deux stations dans chaque bassin versant.

Les résultats indiquent notamment que les séries chronologiques présentent une variabilité interannuelle de la sécheresse et montré que les deux indices se comportent de la même manière. le RDI est plus sensible que le SPI aux conditions climatiques, et donc nous ne pouvons pas négliger le rôle de l'ETP dans les calculs de sécheresse.

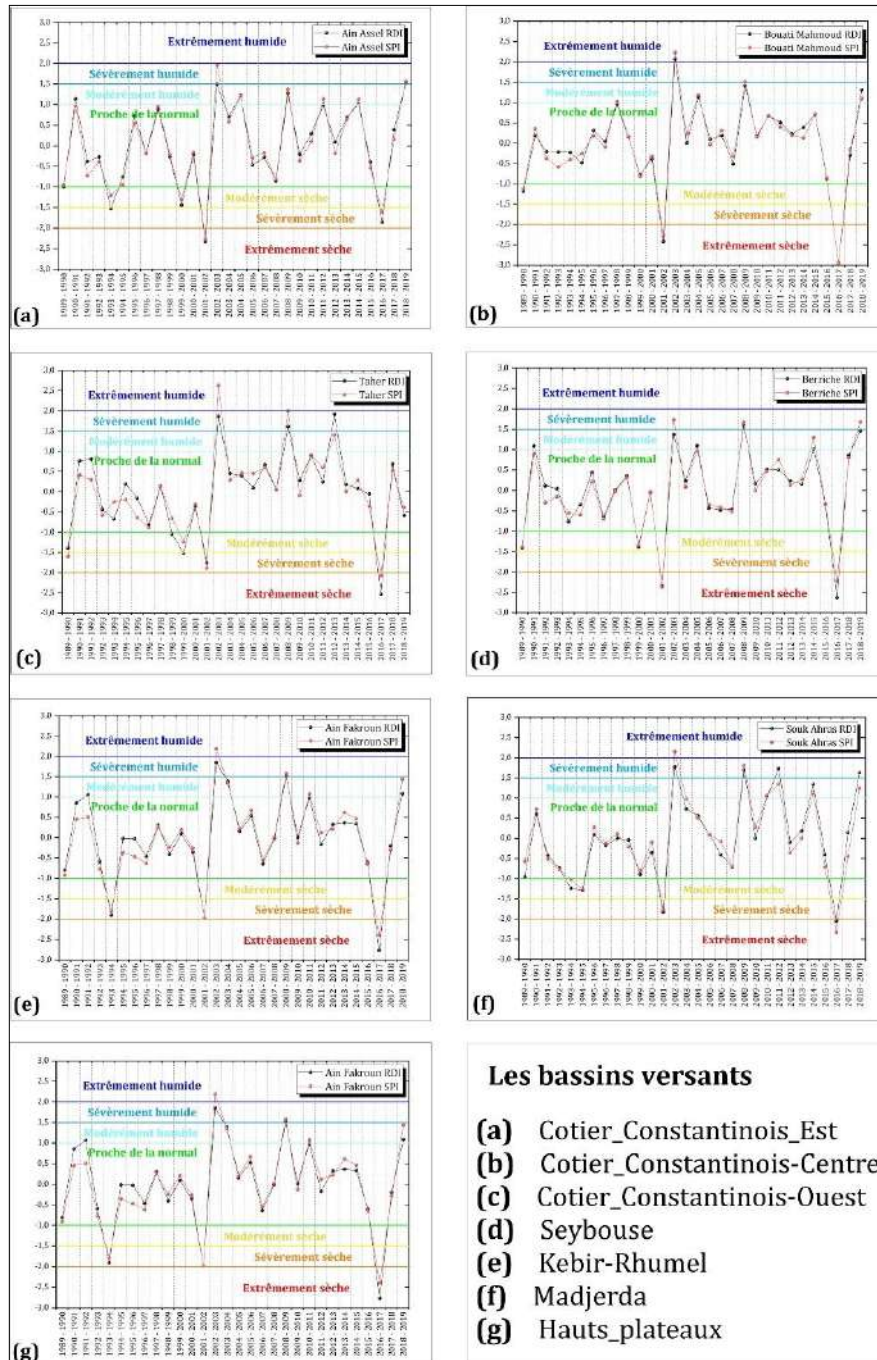


Figure 59 : Variation temporelle du SPI et RDI annuelle sur la région hydrographique (CSM) entre l'année hydrologique 1989-1990 au 2018-2019



### 3. Analyse de la la sécheresse basée sur des données de télédétection

#### 3.1. Caractéristiques techniques du capteur MODIS –TERRA

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un spectro-radiomètre installé à bord du satellite Terra du système d'observation de la Terre (EOS), lancé en 1999, ainsi qu'à bord du satellite Aqua de la NASA, lancé le 4 mai 2002 (Rebello et al., 2017).

Bisht et al., ( 2005 ) ont rapporté que le produit MODIS possède 36 bandes spectrales allant de 0,405 à 14,385  $\mu\text{m}$ . Le capteur offre une capacité d'imagerie quasi quotidienne à l'échelle mondiale, complétant la couverture spectrale, spatiale et temporelle (Justice et al., 1998 ). La résolution spatiale du produit va de 250 à 1000 m.

Sur la base des indices de végétation, les produits MODIS ont été largement utilisés pour surveiller la dynamique de la végétation et les tendances de la sécheresse à court et à long terme à des échelles spatiales et temporelles (Swain et al., 2011). De plus, ces produits sont gratuits, faciles à télécharger et utilisés depuis 2000.

Tableau 32 : Description des données utilisés dans l'étude

Capteur	Fréquence d'acquisition	Résolution spatiale (m)	Les produits utilisés	Site web
MOD13Q1,006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m	16 days	250 m	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/">https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/</a>
MOD11A2,006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km	8 day	1000 m	Land Surface Temperature (LST)	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/">https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/</a>

Orimoloye et al, (2021) ont utilisé MODIS pour évaluer l'occurrence de la sécheresse en Afrique du Sud. La technique utilisée dans cette étude a révélé la pertinence des données MODIS pour évaluer les conditions de sécheresse et leurs impacts environnementaux potentiels. La reconstruction des données peut améliorer efficacement la précision de presque tous les indices de sécheresse basés sur MODIS pour la surveillance de la sécheresse (Xie et al, 2021). Deux produits du satellite MODIS avec une résolution spatiale de 250 m et 1000 m ont été utilisés pour le calcul des indices de sécheresse, obtenus du Google Earth Engine (GEE) pour la période 2000 à 2020. Le tableau 32 montre plus d'information sur ces produits.

### 3.2. Développement des indicateurs satellitaires

#### 3.2.1. Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Le NDVI est le produit de données satellitaires le plus largement utilisé pour surveiller l'état hydrique de la végétation en général et sa sensibilité à la sécheresse en particulier.

La rareté de l'eau végétative pendant la sécheresse limite la croissance et la productivité de la végétation. La chlorophylle, qui est le pigment des feuilles des plantes, absorbe fortement la lumière rouge (de 0,6 à 0,7  $\mu\text{m}$ ) pour la photosynthèse. La structure cellulaire des feuilles réfléchit fortement la lumière proche infrarouge (de 0,7 à 1,1  $\mu\text{m}$ ). L'ampleur de l'absorption et de la réflexion de la lumière rouge et proche infrarouge est fortement fonction de la surface foliaire et de la vigueur de la végétation. L'imagerie satellitaire a longtemps été utilisée pour évaluer les différences de réflectance des plantes et pour déterminer leur distribution spatiale. Un indice d'image satellite couramment utilisé pour évaluer la vigueur de la végétation est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Huete et al., 1985; Jackson et Huete, 1991), qui varie de -1 à 1, avec  $\sim 0,5$  à 1 représentant une vigueur élevée de la végétation.

Il est recommandé d'utiliser les valeurs radiométriques dérivées des bandes R (bande spectrale du rouge) et PIR (bande spectrale du proche infrarouge) pour calculer l'NDVI selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

#### 3.2.2. La température de surface des terres (LST)

Les valeurs NDVI sont utilisées pour calculer l'émissivité de surface de la Terre (LSE)

$$LSE = 0,004P_V + 0.986$$

Attendu que,  $P_V$  est la proportion de végétation, basée sur une valeur NDVI normalisée de chaque pixel.

$$P_V = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

La méthode de travail pour extraire le LST est basée sur les données fournies par LANDSAT 8 d'une part dans les bandes 4 et 5 et d'autre part dans les deux bandes 10 et 11.

$$BT = \frac{K_2}{\ln \ln \left( \frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)}$$

Enfin, en utilisant une combinaison de l'émissivité de la surface de la Terre, de la longueur d'onde du rayonnement émis et de la température photométrique maximale de l'atmosphère, la température de surface peut être extraite.

$$LST = \frac{BT}{\left[ 1 + \left( \lambda \times \frac{E}{\rho} \right) \times \ln \ln (LSE) \right] - 273.15}$$

Ou BT est la température de brillance (Kevin)  $\lambda$  est la longueur d'onde de la bande ( $\mu\text{m}$ ) ;  $\rho = 14380$  ; LSE est l'émissivité de la surface terrestre, Ici,  $\rho = h \cdot c / \zeta$ , où h est la constante de Plank ( $6,626 \cdot 10^{-34}\text{Js}$ ), c est la vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8\text{m/s}$ ) et  $\zeta$  est la constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}\text{J/K}$ ).

### 3.2.3. Condition de végétation VCI

Le VCI est un indice de végétation dérivé des valeurs maximales et minimales du NDVI. L'indice identifie les conditions de sécheresse et leur apparition, en particulier dans les zones où le phénomène est faible et mal défini. Il examine les effets sur la végétation et fournit des informations sur le début, la durée et l'intensité des sécheresses en enregistrant les changements de végétation et en les comparant aux valeurs historiques.

Un VCI proche de zéro reflète un NDVI se rapprochant du NDVI minimum, tandis qu'un VCI proche de 1 reflète un NDVI se rapprochant d'un NDVI maximum. En termes simples, des valeurs VCI faibles représentent des conditions de stress hydrique, tandis que des valeurs VCI élevées représentent des conditions favorables. Plusieurs auteurs qui ont utilisé le VCI pour surveiller la sécheresse ont constaté que des conditions de sécheresse se produisent lorsque le VCI est inférieur à 35 (Kogan, 1997 ; Kogan 1995).

Cet indice prend en entrée les valeurs minimale, maximale et actuelle du NDVI de la même décennie sur plusieurs années. Il fournit des informations sur l'état de la végétation pour la décennie examinée par rapport aux situations extrêmes (min et max).

Il est calculé par la formule suivante :

$$VCI = 100 \times \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

### 3.2.4. Condition de température TCI

Comme VCI, TCI est un indicateur dérivé de la température de surface. Cet indice de température mesure le stress que la température et l'humidité excessive exercent sur la végétation. Les conditions sont estimées en fonction des températures maximales et minimales et ajustées pour les différentes réponses de la végétation à la température.

Les valeurs basses du TCI représentent des conditions de stress hydrique, tandis que les valeurs élevées du TCI représentent des conditions où il n'y a pas de stress hydrique.

Cet indicateur est basé sur la température de brillance. Il peut être appliqué à l'échelle régionale ou continentale, de manière instantanée ou pour des périodes allant jusqu'à un an. Le TCI fournit également des informations utiles concernant le stress de la végétation dû à une saturation du sol en eau (Kogan, 1997).

Le TCI est définie par la formule suivante :

$$TCI = 100 \times \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$$

### 3.2.5. Conditions de végétation et de température VHI

Selon Kogan (1997), le TCI associé au VCI est une source utile d'informations sur le stress hydrique pour la végétation. C'est également un outil précieux pour surveiller en quasi temps réel la santé de la végétation et les impacts climatiques. Combinés aux données collectées sur le terrain, ces indicateurs se révèlent être d'excellents outils de suivi des conditions de sécheresse, notamment en agriculture.

Le VHI est définie par la formule suivante :

$$VHI = a \times VCI + (1 - a)TCI$$

Ou  $\alpha$  est la contribution relative de VCI et TCI dans le VHI. Selon la plupart des publications,  $\alpha = 0,5$ , en supposant une contribution égale des deux indices et en l'absence d'informations plus précises (Kogan, 2000).

Le VHI est utilisé pour diverses applications telles que la détection de la sécheresse, la durée de la sécheresse, le rendement des cultures et la production au cours de la période de végétation (Unganai et Kogan 1998).

$$VHI = a \times VCI + (1 - a)TCI$$

La méthodologie utilisée (Fig. 60) pour la surveillance et l'évaluation de la sécheresse a utilisé des données de télédétection et des données météorologiques fournies par Google Earth Engine et TerraClimate. Les bandes optiques et thermiques ont été utilisées pour calculer l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et la Température de Surface Terrestre (LST). Les valeurs minimales et maximales de réflectance du NDVI et du LST ont été extraites pour calculer les VCI et TCI annuels. En combinant ces deux indicateurs (VCI et TCI) à l'aide d'un algorithme, des images du VHI (indice de santé de la végétation) ont été obtenues, qui dépendent du stress thermique et de l'état de la végétation. L'Indice de Précipitation Normalisée (SPI) a été calculé à partir des données de précipitation à l'aide du logiciel R Studio. Il mesure l'état qualitatif de la sécheresse à un endroit donné pendant une période donnée sur différentes échelles de temps.

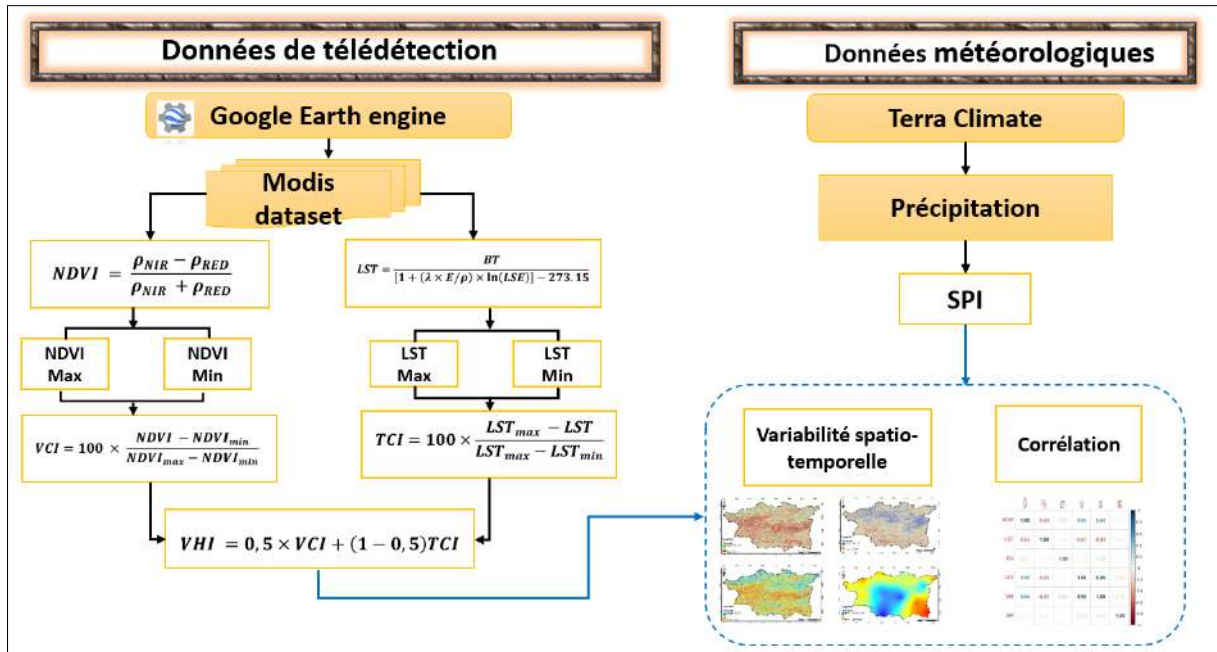


Figure 60 : Organigramme représentant la méthodologie adoptée

### 3.3. Analyses spatiales

Les cartes qui concernent l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) annuel sont considérées comme un indicateur majeur pour l'évaluation de la sécheresse agricole. Le NDVI est dérivé pour le bassin versant de CSM à l'échelle spatio-temporelle de 2001 à 2019.

Les valeurs du NDVI correspondent à la couverture végétale et ont une relation directe avec l'état et la santé de la végétation. Ces valeurs sont distribuées de 0 à 1 et ont été classées en 6 classes : très élevé (> 0,8), élevé (0,6-0,8), modéré (0,4-0,6), faible (0,2-0,4), très faible (0-0,2) et sol nu/collectivités d'eau (<0). Comme le montrent les figures qui représentent la variabilité spatio-temporelle du NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI, les classes NDVI très élevées et élevées ne sont présentes que dans les parties nord, tandis que le reste de la région d'étude est caractérisé par une couverture végétale faible et très faible. En particulier, les classes de NDVI très bas montrent une forte intensité dans la partie centrale et sud, qui correspond à la région des hauts plateaux constantinois. En ce qui concerne les classes de NDVI bas, c'est la classe prédominante distribuée dans le bassin versant tout au long des années 2001-2019.

L'analyse spatio-temporelle de l'Indice de Condition de Température montre que la catégorie de température élevée (31-35) est prédominante dans la région d'étude tout au long des années 2001-2019 et présente une intensité élevée en 2001, couvrant la zone du bassin versant de la Medjerda.

L'Indice de Condition de Température (TCI) est largement utilisé dans les études d'évaluation de la sécheresse car la température joue un rôle majeur dans l'identification de l'occurrence de la sécheresse.

Les valeurs du TCI ont une relation indirecte avec la sécheresse, car lorsque les valeurs du TCI diminuent, le degré de sécheresse devient plus fort.

L'analyse spatio-temporelle du TCI montre que les conditions de sécheresse élevée et extrême sont principalement marquées par une distribution intense dans toute la zone d'étude en 2001, tandis qu'en 2010, une concentration élevée est observée dans la partie nord.

L'Indice de Condition de la Végétation (VCI) est un indicateur important qui montre l'état de la végétation prévalant dans la région d'étude et qui aide à évaluer l'état de la sécheresse.

L'analyse spatio-temporelle du VCI annuel montre que la végétation diminue progressivement au fil des années pour atteindre un état de sécheresse extrême en 2010 avec une valeur maximale de 91 %.

La classe de sécheresse faible du VCI est principalement distribuée dans la partie nord de la région. De plus, la classe de VCI modérée couvre la majeure partie du bassin versant tout au long de la période d'étude.

Les valeurs du VHI comprises entre 0,15 et 76,75 correspondent directement à l'occurrence de la sécheresse agricole et sont calculées à partir des valeurs du VCI et du TCI.

Les valeurs de VHI ont été catégorisées en cinq classes comme sécheresse extrême (<10), sécheresse élevée (11-20), sécheresse modérée (21-30), sécheresse légère (31-40) et aucune sécheresse (>40).

L'analyse spatio-temporelle de la VHI annuelle révèle une nette disparité entre les valeurs dans la partie nord, qui sont considérablement plus élevées, et celles dans la partie centre et sud de la région d'étude, qui sont constamment faibles.

Le VHI indique que le stress de la végétation a augmenté progressivement à partir de 2001 et devient prédominant en 2005 avec une intensification marquée de la classe VHI correspondant à une sécheresse extrême (<10).

Les valeurs du SPI indiquent que la sécheresse météorologique commence à tout moment lorsque la valeur du SPI est négative et atteint près de -1 ou moins. Une valeur négative de l'indice SPI indique des périodes de sécheresse, tandis qu'une valeur positive correspond à des conditions humides ou non-sèches.

Le SPI le plus bas sur une période de 12 mois était de -2,6 (extrêmement sec) au cours de l'année 2001. Les résultats obtenus par l'indice de précipitation normalisé indiquent une réduction des précipitations entre 2001 et 2005. Les zones les plus exposées à l'effet de la sécheresse sont celles situées à des altitudes moyennes et éloignées de la mer.

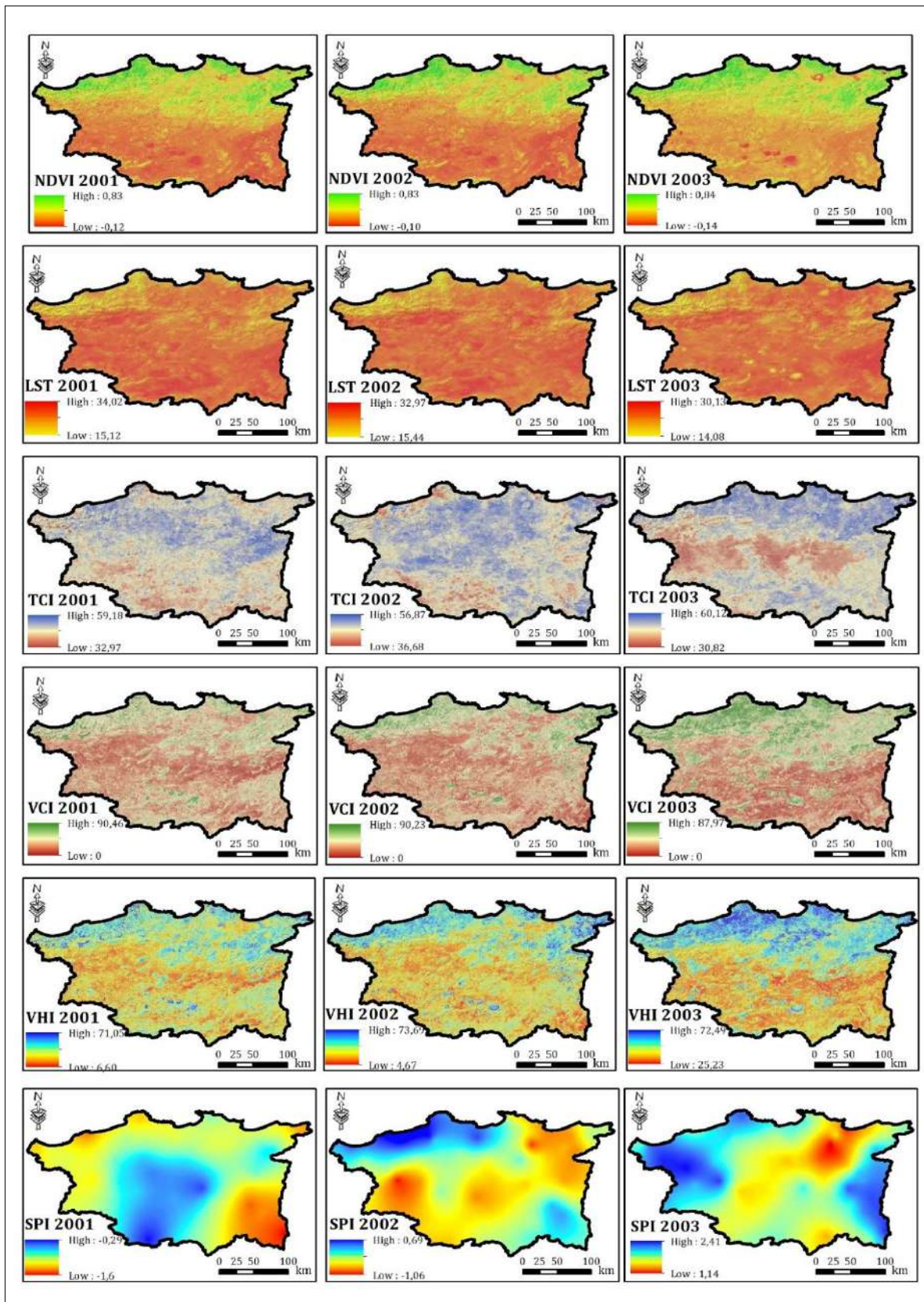


Figure 61 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2001-2003)

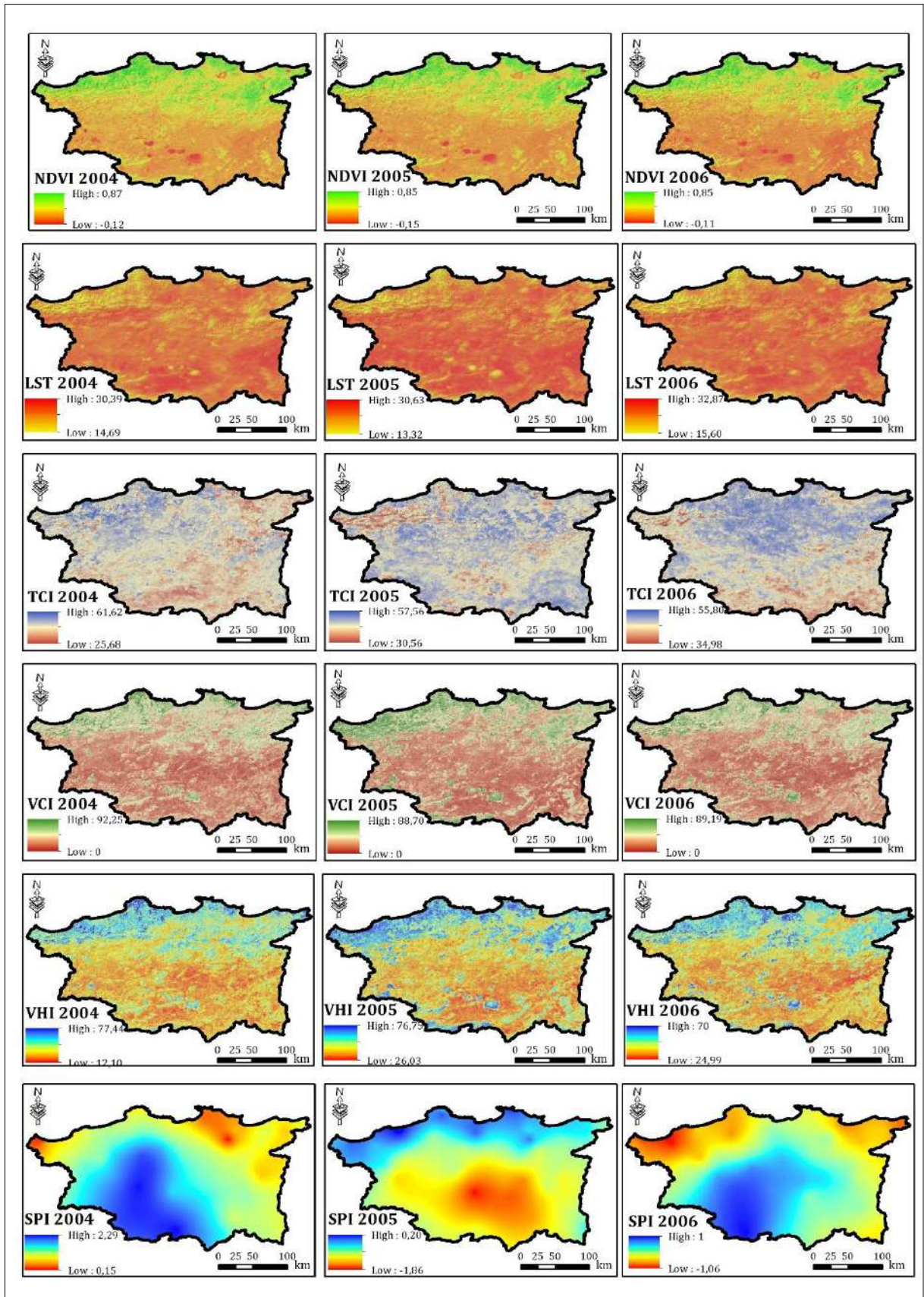


Figure 62 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2004-2006)



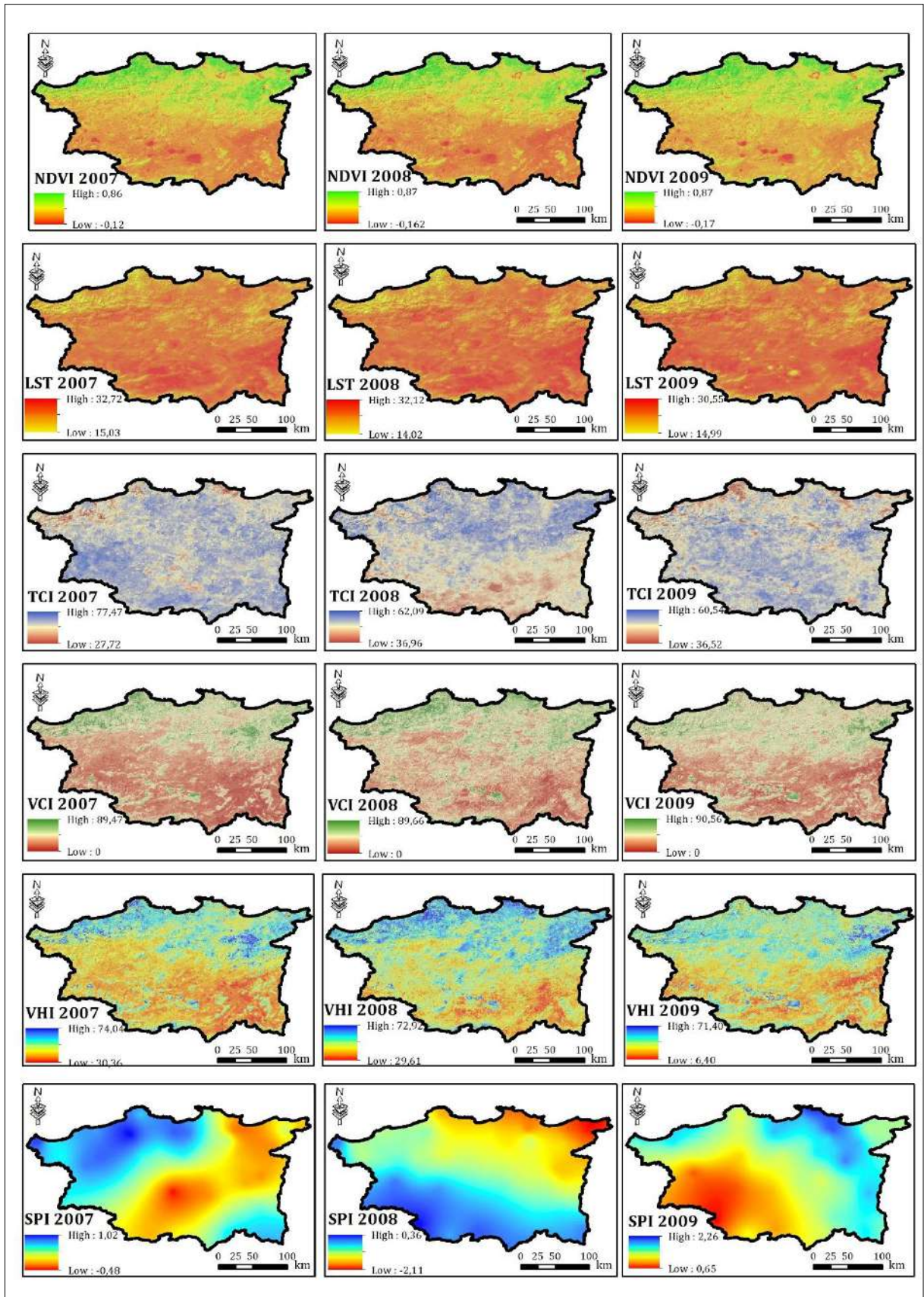


Figure 63 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2007-2009)

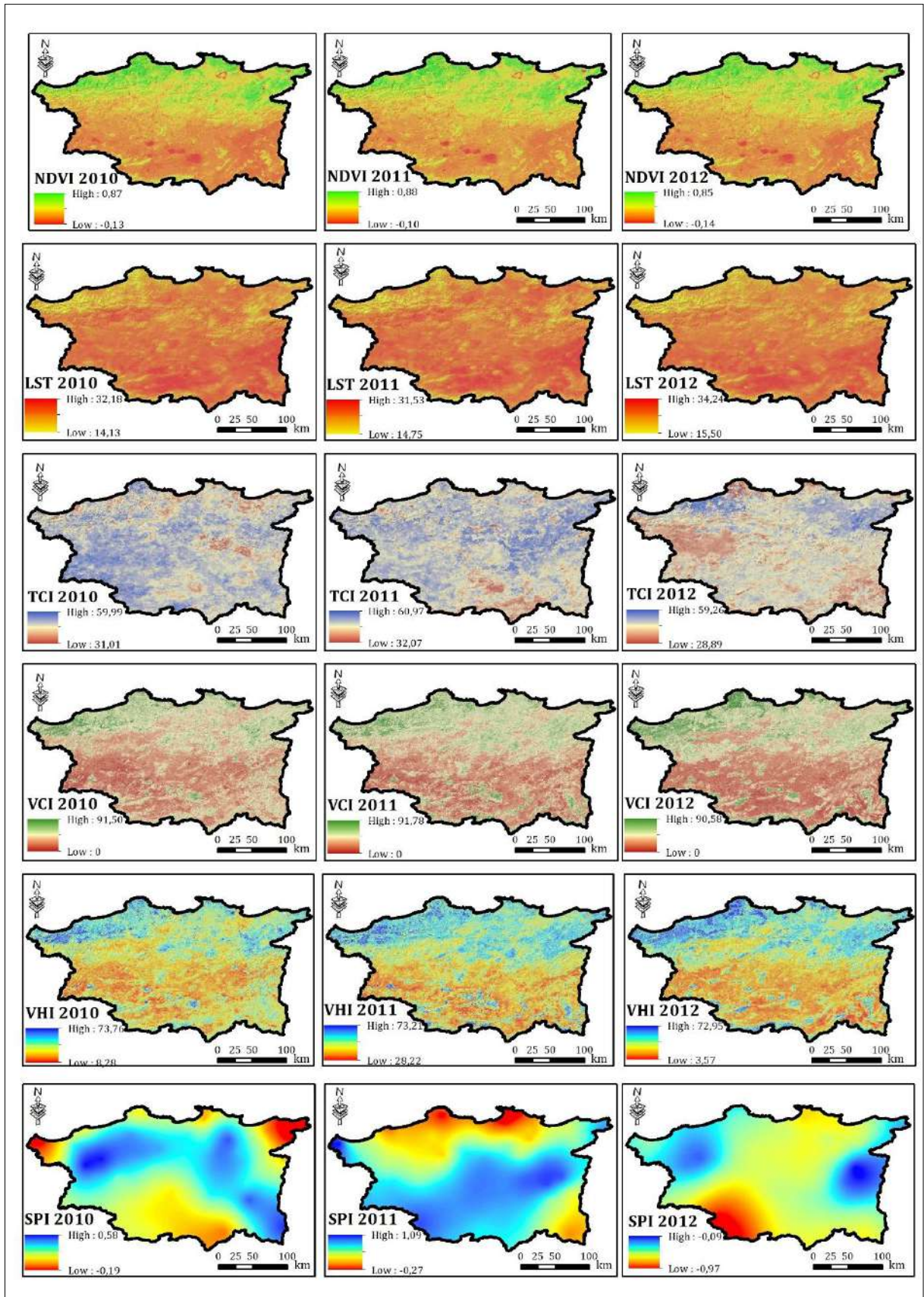


Figure 64 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2010-2012)

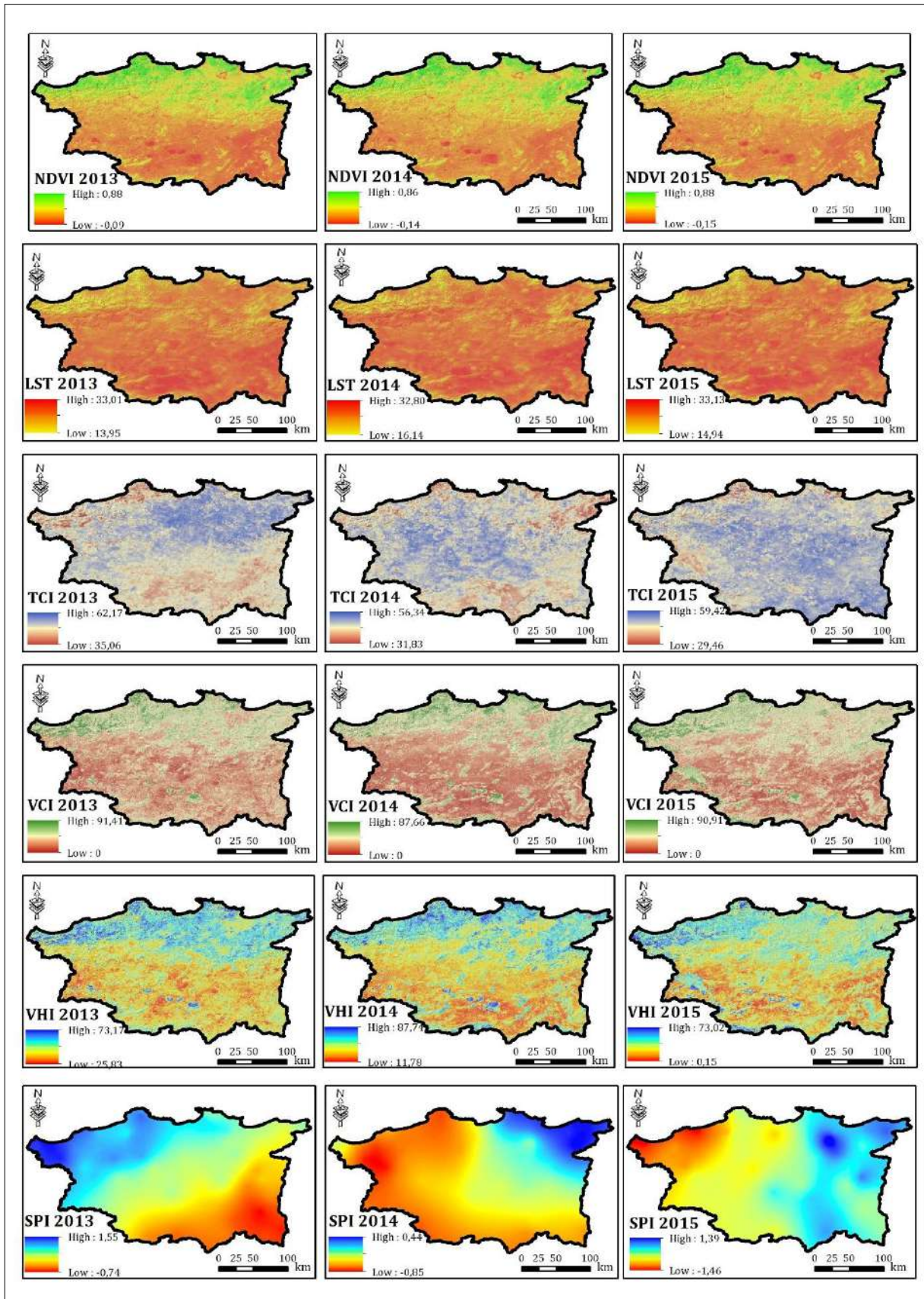


Figure 65 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2013-2015)

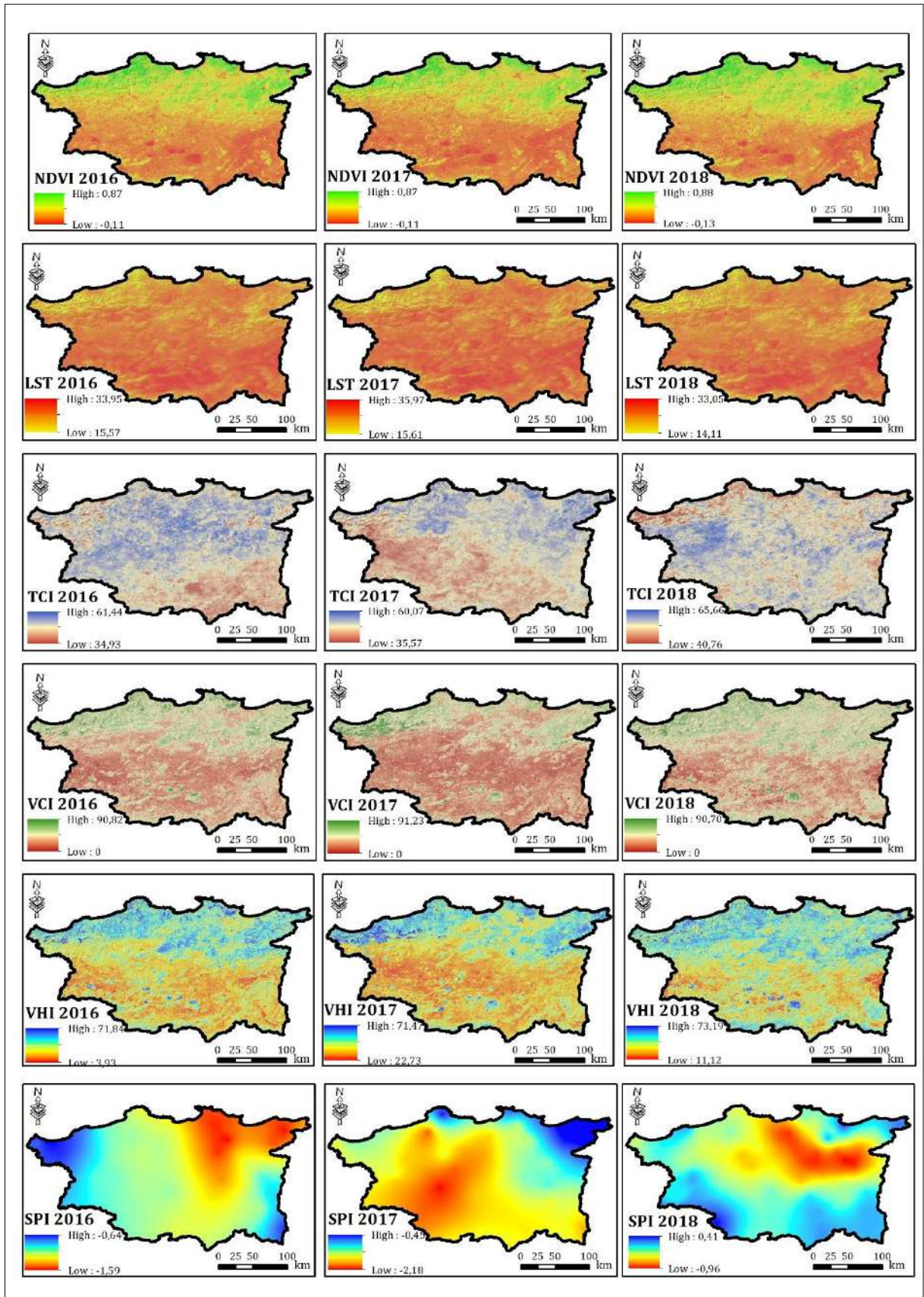


Figure 66 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2016-2018)

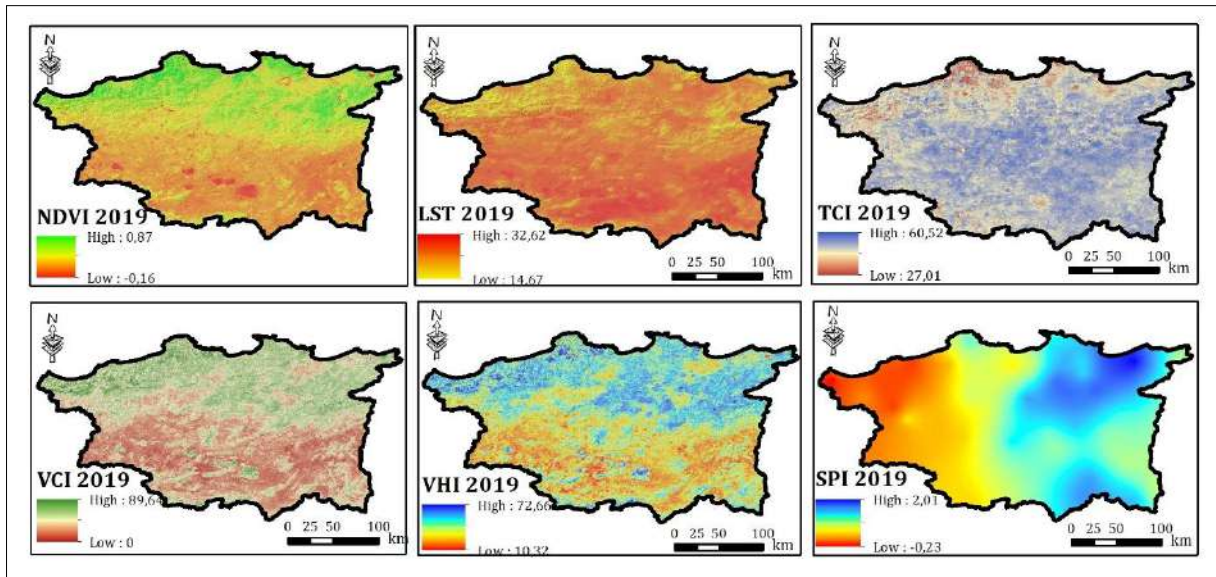


Figure 67 : Variabilité spatio-temporelle de NDVI, LST, TCI, VCI, SPI et VHI (2019)

#### 4. La corrélation entre l'indice SPI et VHI

Cette corrélation a été effectuée pour la période 2001-2019 et représentée sous forme de matrice de corrélation (Figure 68) entre la température de surface terrestre (LST), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de condition de la végétation (VCI), l'indice de condition de la température (TCI), l'indice de santé de la végétation (VHI) et l'indice de précipitation normalisé (SPI) afin de déterminer comment NDVI et LST, VCI et TCI, SPI et VHI sont liés.

Les résultats de la corrélation ont révélé que le LST et le NDVI étaient négativement corrélés et se situaient entre ( $r = -0,48$  et  $r = -0,8$ ). Lorsque la LST augmente à une certaine valeur, le NDVI a tendance à diminuer car la LST est plus élevée pendant la journée que pendant la nuit. Cela provoque un niveau plus élevé de stress végétal, ce qui peut conduire à l'occurrence de la sécheresse. Une autre raison importante est l'augmentation de l'évaporation ainsi que la diminution de l'humidité du sol causée par des températures plus élevées, ce qui affecte le NDVI.

Le VCI et le TCI ont été utilisés avec succès ces dernières années pour détecter la sécheresse et le stress végétal, car ils dépendent fortement des conditions météorologiques et écologiques. Il est donc impératif de vérifier la relation entre ces deux indicateurs de sécheresse agricole. Cependant, cette étude indique également qu'il existe une relation positive entre le VCI et le TCI. Lorsque le TCI augmente, le VCI a également tendance à augmenter.

De plus, la relation statistique entre le SPI et le VHI a montré comment la sécheresse agricole surveillée par le VHI est associée à la sécheresse météorologique mesurée par le SPI. Les résultats de corrélation montrent que la relation entre le SPI et le VHI est positive et statistiquement significative dans tous les districts de la zone d'étude. Les résultats indiquent

que lorsque le SPI augmente, le VHI a également tendance à augmenter. Cela peut conduire à une incidence plus fréquente et plus intense des sécheresses, ce qui explique clairement la relation entre la sécheresse météorologique et agricole.

La corrélation la plus élevée a été observée dans la région du bassin versant Medjerda-Mellegue, tandis que la corrélation la plus faible a été observée dans la région des bassins versants côtiers constantinois.

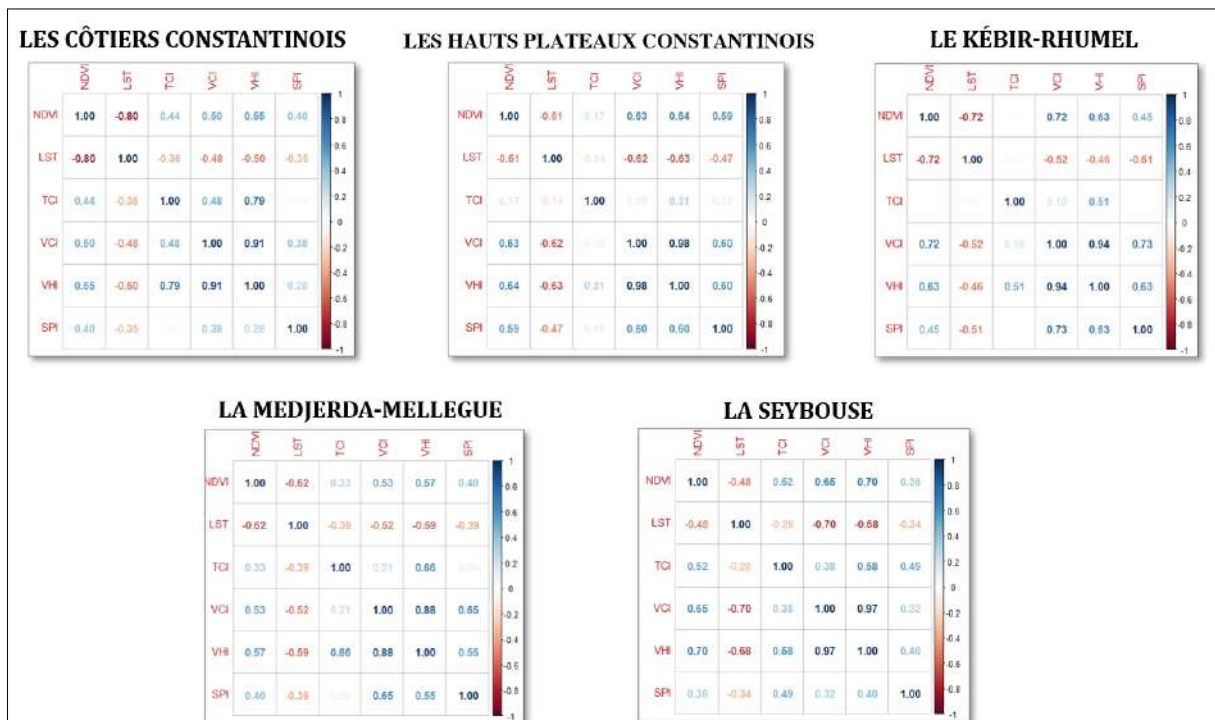


Figure 68 : corrélation NDVI, LST, TCI, VCI, VHI et SPI

## 5. Conclusion

Cette méthode de travail a permis d'observer l'évolution de l'intensité de la sécheresse dans les zones agricoles. L'intensité de la sécheresse varie considérablement dans le temps et dans l'espace. Des épisodes de sécheresse ont été détectés dans le bassin versant de la Medjerda. Par conséquent, il existe une similarité entre les méthodes traditionnelles et de télédétection. Cela montre l'utilité de la télédétection pour améliorer l'information sur les zones difficiles d'accès ou avec une faible disponibilité de données météorologiques conventionnelles pour la surveillance de la sécheresse.

La détection de la sécheresse au niveau du bassin versant montre que le SPI et le VHI seraient utiles et que les deux indices se sont révélés plus sensibles à la sécheresse. La comparaison des deux indices montre un comportement cohérent et similaire, et les coefficients de corrélation de Pearson indiquent des relations positives. Les résultats seraient utiles dans les plans de gestion de la sécurité alimentaire et de l'agriculture durable.



# **Chapitre VI**

*Surveillance spatio-temporelle et détection  
des zones vulnérables à la sécheresse*



## **Chapitre VI: Surveillance spatio-temporelle et détection des zones vulnérables à la sécheresse**

### **1. Introduction**

La télédétection par satellite est considérée comme l'une des principales sources de données pour la surveillance de la végétation, de l'échelle régionale à l'échelle mondiale, principalement en raison de sa capacité à couvrir une variété d'échelles spatiales avec un coût relativement modéré pour les utilisateurs et avec une couverture spatiale étendue et une fréquence de revisite élevée (Cammalleri et al. 2019).

En raison de la variabilité climatique qui a augmenté au cours des dernières décennies, un risque de sécheresse plus élevé influence sérieusement la vitalité de la forêt à l'échelle régionale et mondiale.

L'évaluation précise du risque de sécheresse agricole régionale contribue à améliorer la gestion des risques de catastrophe et à réduire les pertes dues à la sécheresse.

Cette étude se propose pour faire la régionalisation des paramètres climatiques et des indices de sécheresses par le calcul de VHI à différentes échelles de temps basé sur NDVI, LST, VCI, et TCI, puis application de l'algorithme de clustering K-means sur VHI pour trouver différents clusters avec des caractéristiques de sécheresse distinctes. Ensuite l'évaluation de l'intensité et de la fréquence de la sécheresse agricole pour analyser les distributions spatio-temporelles des sécheresses et pour identifier et de cartographier les zones les plus vulnérables au phénomène de sécheresse sur le bassin versant CSM dans le Nord-Est de l'Algérie pendant deux décennies (2000 à 2020).

### **2. Données et méthodologie adoptée**

#### **2.1. Données et source**

Le MNT (modèle numérique de terrain), dérivé de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution spatiale de 30 m, a été utilisé pour délimiter les sous-bassins versants du CSM sur la plateforme du Système d'Information Géographique (SIG). Les indices de sécheresse fiables et cohérents basés sur la télédétection ainsi que le SIG jouent un rôle important dans la cartographie et la surveillance de la sécheresse agricole (Sandeep et al. 2021). Dans cette étude, nous avons utilisé l'indice d'aridité de De Martonne (IDM) pour la classification climatique. Les données de température et de pluviométrie de 2000 à 2020 recueillies dans 44 sous-bassins versants, ont été obtenues à partir du moteur Google Earth Engine. Actuellement, le seul capteur unique fournissant une série chronologique de données raisonnablement longue est le MODIS (Cammalleri et al. 2019). Le MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) est un instrument embarqué à bord du satellite Terra du



système d'observation de la Terre (EOS), lancé en 1999, et également à bord du satellite Aqua de la NASA, lancé le 4 mai 2002 (Rebello et al. 2017).

Deux produits du satellite MODIS avec une résolution spatiale de 250 m et 1000 m, ont été utilisés pour le calcul de l'indice de sécheresse, obtenus à partir du moteur Google Earth Engine (GEE) pour la période 2000 à 2020.

### 2.2. Méthodologie

Cette étude est traitée en utilisant Java Scripting sur le GEE. Cinq indices de base sont sélectionnés pour la surveillance de la sécheresse : NDVI, LST, TCI, VCI, et VHI (figure 69).

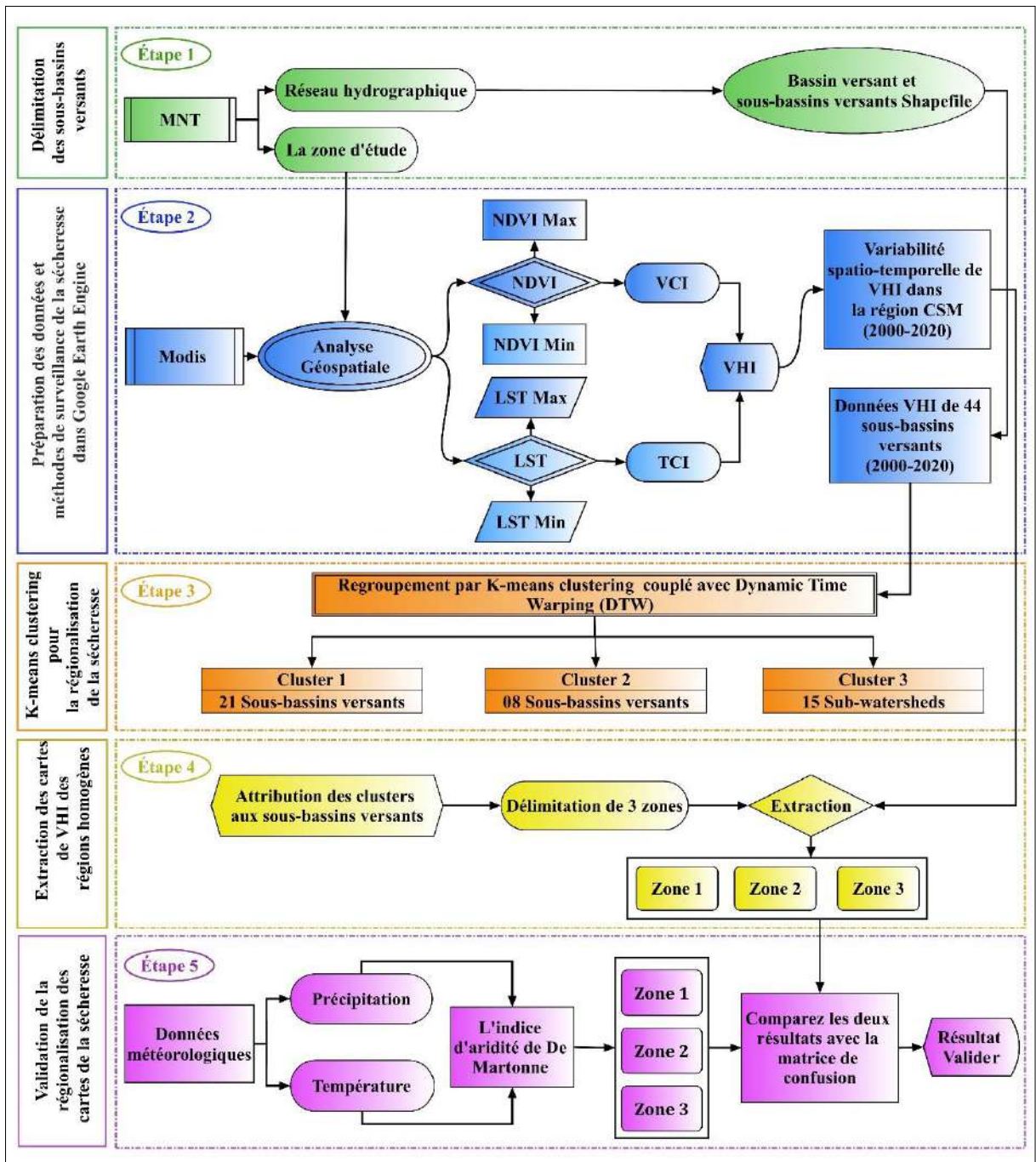


Figure 69 : Organigramme représentant la méthodologie adoptée

### 2.2.1. Clustering

Clustering ( ou partitionnement des données) : cette méthode de classification non supervisé appelée aussi regroupement en français (clustering, en anglais), est un processus qui permet de trouver des groupes d'objets (appelés, clusters) en fonction des variables ou des attributs qui les décrivent.

Le clustering a pour objectif de regrouper dans un même cluster les objets jugés similaires selon une certaine métrique de similarité ( homogénéité intra-classe) et séparer les objets dissimilaires dans des clusters distincts (hétérogénéité inter-classe) (Khatir, 2019).

D'une manière générale, Le processus de clustering s'effectue en trois étapes principales (Figure 70):

- La préparation des données ;
- Le choix de l'algorithme de clustering ;
- La validation et interprétation des résultats.

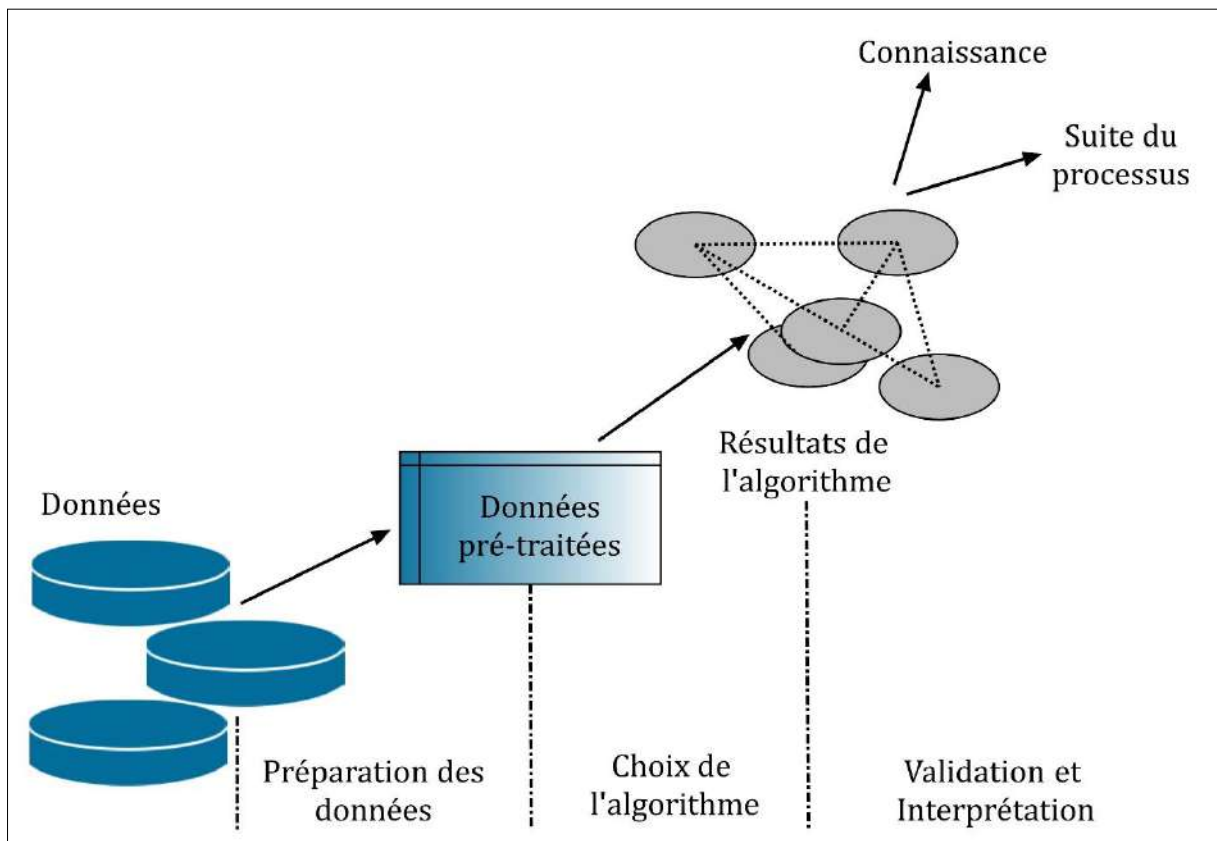


Figure 70 : Les différentes étapes du processus de clustering

Cette étude développe une méthode dans laquelle l'indice de sécheresse (VHI) entre 2000 et 2020 est classée par K-means clustering couplé avec Dynamic Time Warping (DTW) pour diviser notre région d'étude en utilisant le paquet "dtwclust" dans le programme statistique RStudio (ver 4.0.2).

Le logiciel R est un logiciel statistique développé par Ross Ihaka et Robert Gentleman. C'est à la fois le langage de l'ordinateur et de l'environnement de travail : les commandes sont exécutées à l'aide d'instructions codées dans un langage relativement simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont affichés directement dans la fenêtre.

### 2.2.2. Dynamic Time Warping (DTW)

Dynamic Time Warping (ou Déformation Temporelle Dynamique en français) est inspirée de la distance de Levenshtein, également appelée distance d'édition, et a été introduite par Sakoe et Chiba (1978) dans le domaine de la reconnaissance vocale.

DTW est un algorithme permettant de mesurer la similarité entre deux suites qui peuvent varier au cours du temps. Cette méthode a déjà montré son efficacité dans plusieurs travaux (Ruiz et al., 1985, Vuori, 2002, Narita et al., 2008).

Le traitement des séries temporelles a souvent pour but d'identifier des tendances en essayant d'extrapoler des courbes pour prédire l'évolution d'un phénomène.

On peut calculer le DTW grâce à la formule suivante récursive :

Soient deux séries  $S = s_1, s_2, \dots, s_m$  et  $T = t_1, t_2, \dots, t_n$ ,

Soit  $D(i,j)$  la distance entre les séries  $s_1, s_2, \dots, s_i$  et  $t_1, t_2, \dots, t_j$  avec  $1 \leq i \leq m$  et  $1 \leq j \leq n$ :

$$D(i,j) = \begin{cases} |s_1 - t_1|, & \text{si } i = j = 1; \\ |s_i - t_j| + \min(D(i-1, j), D(i-1, j-1)), & \text{sinon} \end{cases}$$

On a donc au final :  $DTW(S,T) = D(m,n)$

### 2.2.3. Classification par k-means clustering

L'algorithme des K-means, ou l'algorithme des K-moyennes a été introduit initialement par J.MacQueen (1967). Il est l'un des algorithmes de machine learning non supervisés les plus faciles à comprendre et à utiliser.

Le K dans K-mean indique le nombre de clusters dans lesquels l'ensemble des données est classifié ou partitionné, L'idée principale est de choisir aléatoirement k objets qui représentent les centroïdes initiaux. Un objet est assigné au cluster pour lequel la distance entre l'objet et le centroïde est minimale.

L'algorithme de clustering K-mean est fréquemment répété plusieurs fois, et finalement sélectionné comme le plus approprié.

### 2.2.4. Analyse spatiale et cartographie

La délimitation manuelle traditionnelle des bassins versants sur les cartes topographiques et les données des enquêtes de terrain ont été les premières méthodes utilisées pour étudier la géomorphologie des bassins versants. Généralement, cette méthode pour les bassins versants à grande échelle prend beaucoup de temps. Mais maintenant, avec le développement de l'informatique et des technologies de l'information, la délimitation automatique des bassins

versants devient plus rapide et plus précise. À cet effet, les logiciels SIG, notamment ArcGIS, fournissent des outils intéressants pour les calculs et les mesures hydro-morphologiques à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) (Akram et al. 2012). Dans cette étude, les données du MNT ont été utilisées pour la délimitation automatique du bassin versant et des sous-bassins versants de la zone d'étude. Pour l'extraction du réseau de drainage et la délimitation des bassins versants, nous avons appliqué l'analyse spatiale "hydrologie" sous ArcGIS en utilisant les outils comme fill, flow direction, flow accumulation, stream order, stream to features, watershed grid delineation et watershed Polygon Processing.

### 2.2.5. Matrice de confusion

Une matrice de confusion ou tableau de contingence sert à évaluer la qualité d'une classification. Elle est obtenue en comparant les données classées avec des données de référence qui doivent être différentes de celles ayant servi à réaliser la classification.

Les données de référence sont issues des données climatiques (température et de précipitations) sur la période de 2000 à 2020. Le calcul de l'indice d'aridité de De Martonne (DMI) a donné une classification climatique dans la zone d'étude. Cette classification a permis une comparaison avec les zones de clustering pour l'indice de sécheresse (VHI).

Construisez une matrice de confusion en plaçant les données de référence (IDM) et la classification (VHI) sur les lignes et les colonnes, respectivement. Cela permet de calculer :

- Précision globale : Nombre de pixels bien classés (sous-bassins) divisé par le nombre total d'individus.
- Erreur excessive: Le pourcentage de pixels (sous-bassins) de la classe résultant de la classification qui appartiennent effectivement à d'autres classes dans les données de référence.
- Précision utilisateur : Pourcentage de pixels de classe (sous-bassins) issus des classifications correspondant à la même classe dans les données de référence. Il est égal à "100 % - Erreur excessive".
- Erreur de déficit : Pourcentage de pixels (sous-bassins) de la classe de référence qui sont affectés à d'autres classes par classification.
- Précision pour le réalisateur : Pourcentage de pixels de la classe de référence (sous-bassins) qui sont classés dans la même classe, égal à "100 % - Erreur de déficit".

Des matrices de confusion contrôlant le classement doivent toujours être fournies pour chaque catégorie, et le risque de confusion avec telle ou telle autre catégorie (Girard et Girard, 1999).

### 3. Les résultats de Clustering

Le bassin versant du CSM a été subdivisé en quarante-quatre sous-bassins versants en fonction des lignes de crête, de la ligne de partage des eaux, des courbes de niveau et d'autres caractéristiques hydro-morphologiques en conjonction avec le MNT. Les étiquettes SBV1 à SBV44 ont été attribuées aux sous-bassins versants.

Pour obtenir de meilleurs résultats de clustering, l'indice d'aridité de De Martonne a été utilisé pour optimiser le nombre de clusters. Le nombre optimal de clusters était basé sur les trois types de climat résultants dans la région. Les pourcentages de régions humides, subhumides et semi-arides étaient respectivement de 18,89 %, 41,17 % et 39,94 % (figure 71).

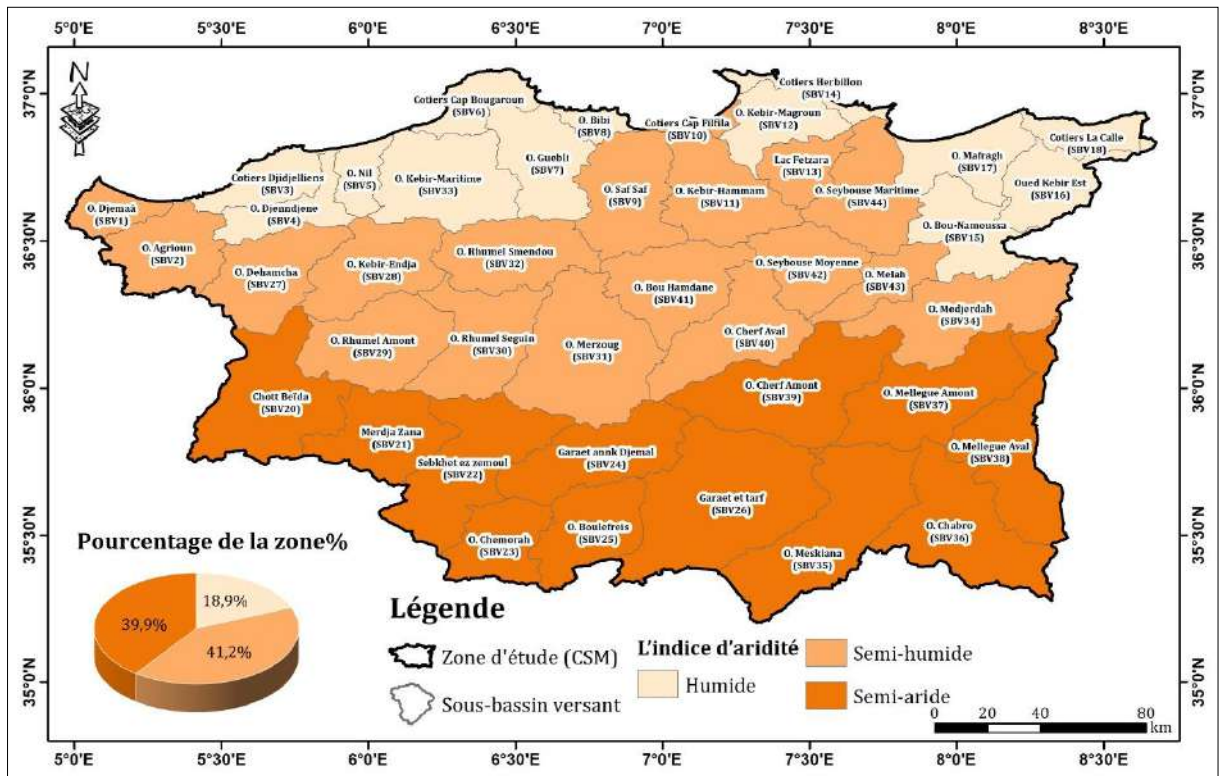


Figure 71 : Carte des classes d'aridité IDM dans la zone d'étude

La régionalisation du CSM a été effectuée par la méthode des clusters K-Means pour la délimitation de régions homogènes, et a donné lieu à trois clusters principaux basés sur les types de climats dans la zone d'étude (figure 72), La couleur verte représente le cluster 1 comprenant 21 sous-bassins versants, soit 20,41% de la surface. La couleur jaune représente le cluster 2 comprenant 8 sous-bassins versants, soit 20,41% de la surface, et la couleur rose représente le cluster 3 comprenant 15 sous-bassins versants, soit 49,86% de la surface (tableau 33).

Les résultats présentés dans les figures 73, 74 et 75 indiquent que les valeurs moyennes à long terme (2000-2020) de l'indice VHI dans la zone 1 étaient comprises entre 41,61 et 64,84, tandis que la valeur moyenne de l'indice VHI dans la zone 2 était comprise entre 34,49 et 57,60 et la valeur moyenne de l'indice VHI dans la zone 3 était comprise entre 29,79 et 50,83, Les indices

de sécheresse VHI ont suivi une tendance croissante de la sévérité de la sécheresse de la zone 1 à la zone 3, indiquant que la sécheresse a affecté les bassins du sud plus sévèrement que du nord.

Tableau 33 : Classes dérivées de la méthode de clustering K-means

sous-bassins versants	Cluster	Surface (km <sup>2</sup> )
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 33 et 43	C1	13014.70
27, 28, 32, 34, 40, 41, 42 et 44	C2	8931.78
20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 35, 36, 37, 38 et 39	C3	21821.90

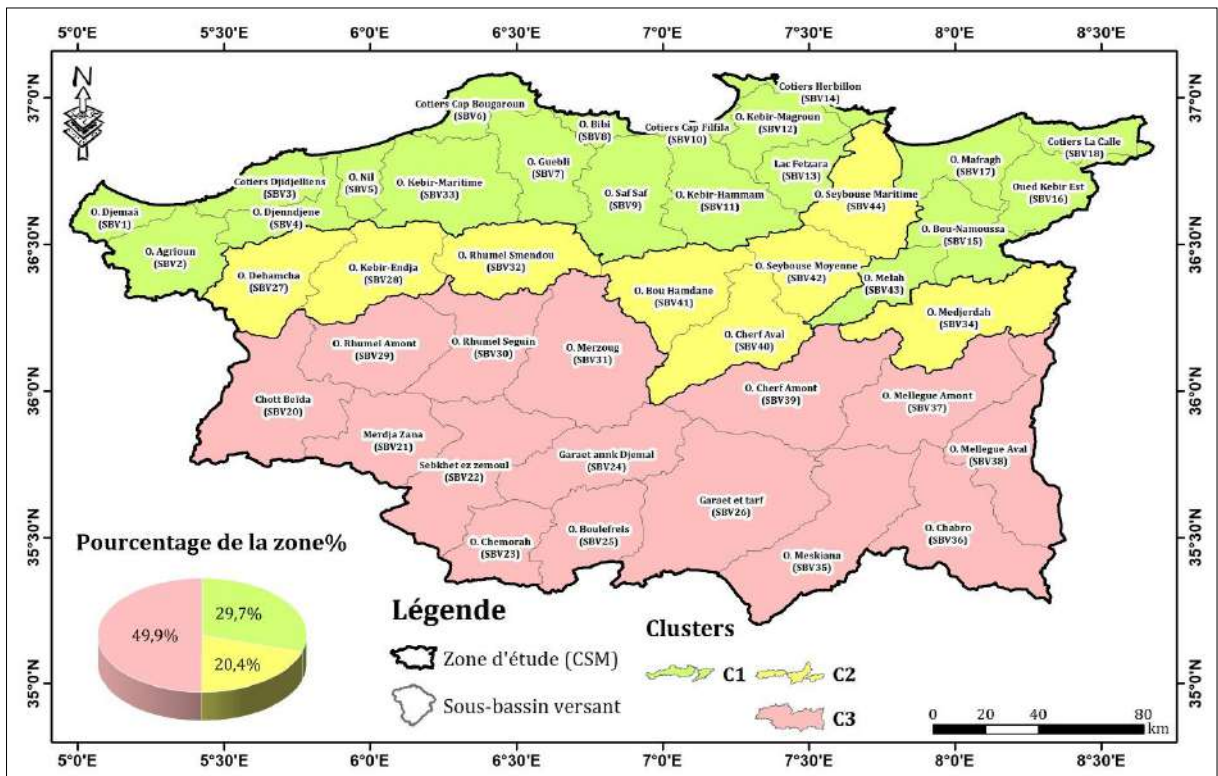


Figure 72 : Distribution spatiale des trois zones de cluster

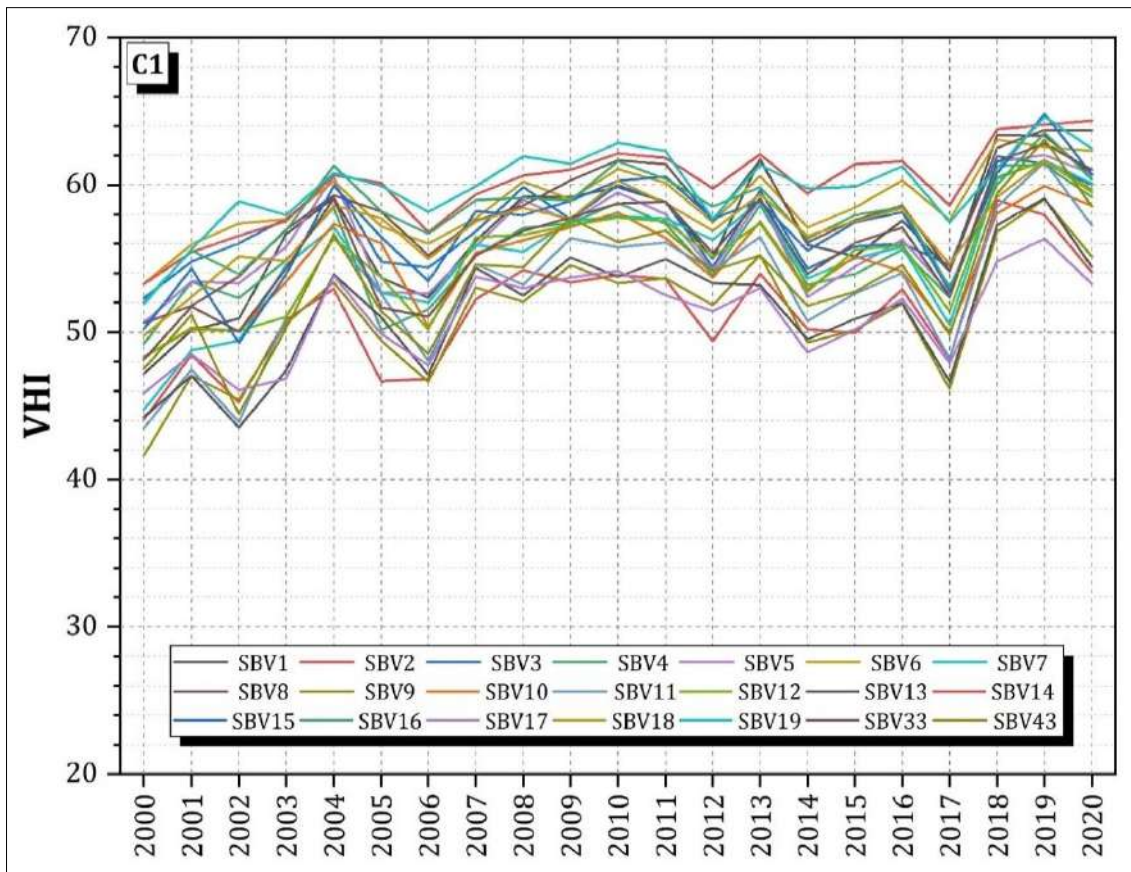


Figure 73 : variation des valeurs moyennes de VHI dans la zone 1

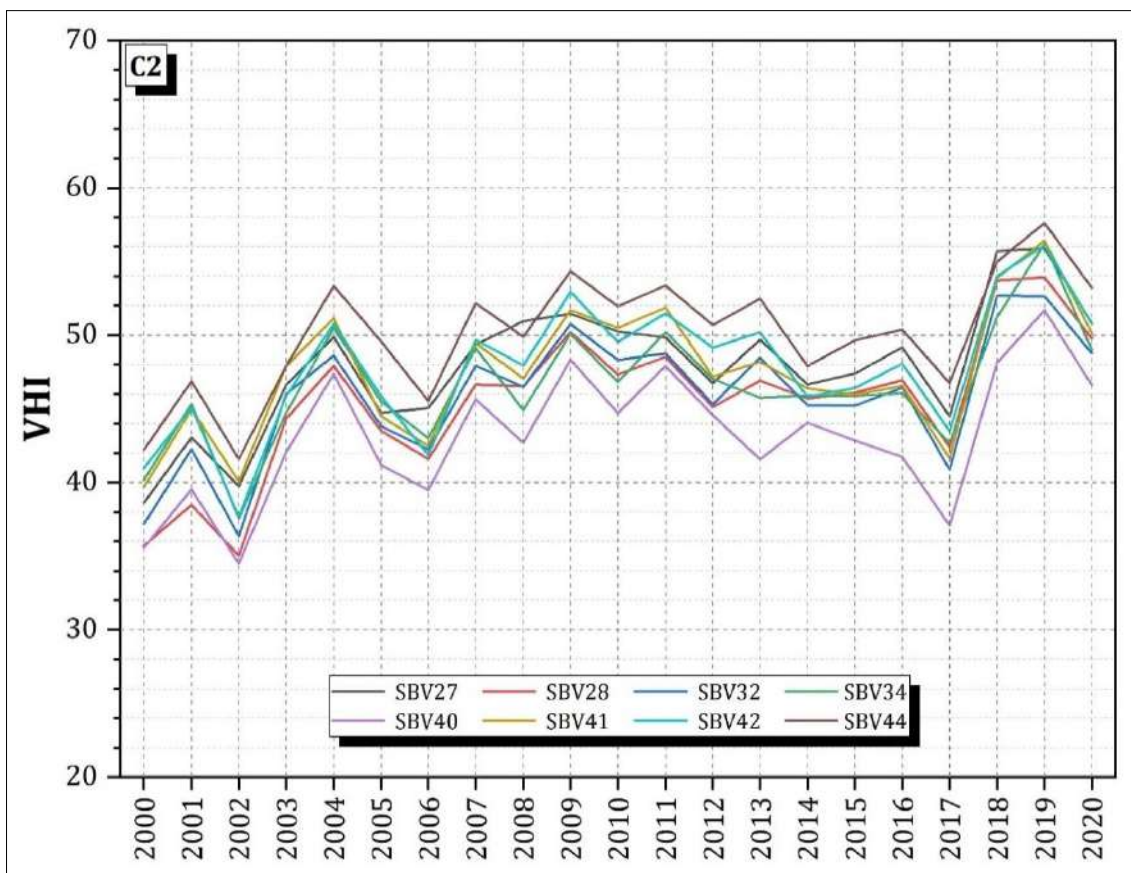


Figure 74 : variation des valeurs moyennes de VHI dans la zone 2

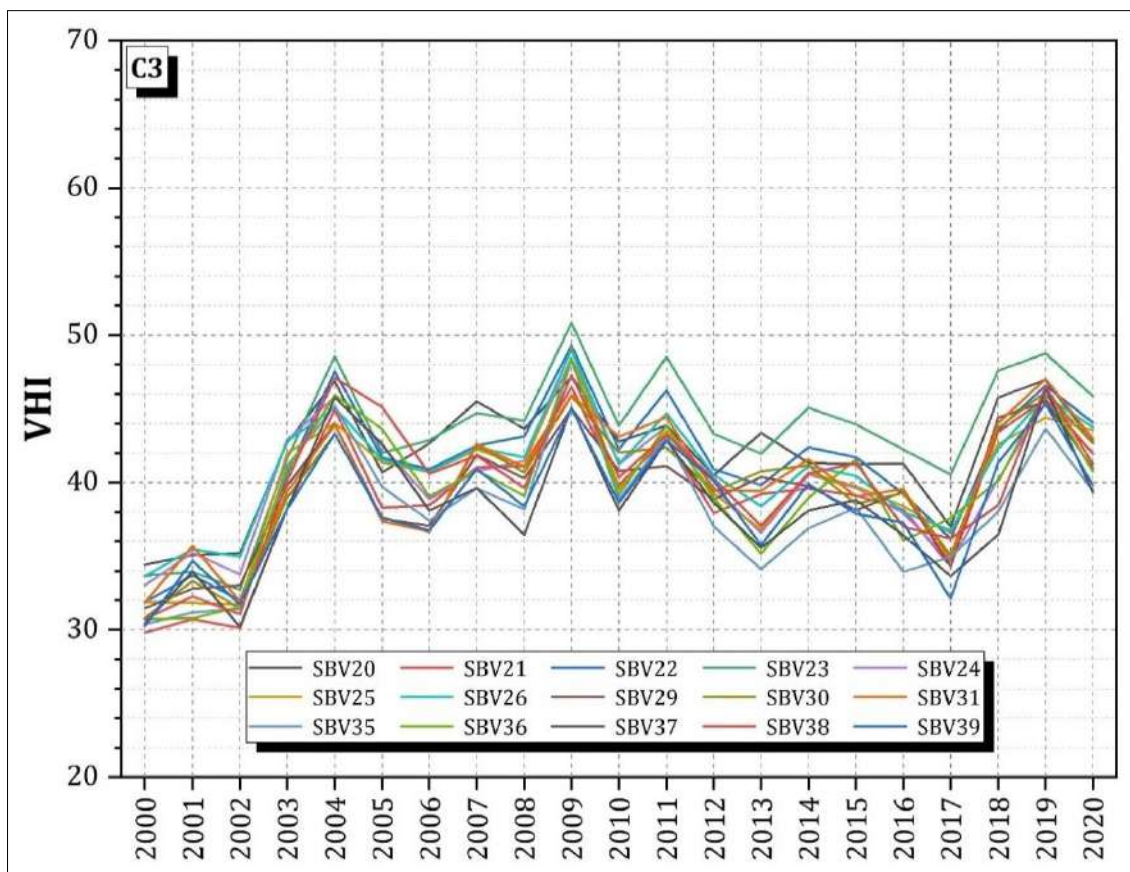


Figure 75 : variation des valeurs moyennes de VHI dans la zone 3

### 3.1. Validation

La méthode de la matrice de confusion a été utilisée pour cette étude afin de valider la régionalisation de la carte de la sécheresse.

La validation a été effectuée en analysant l'indice d'aridité de De Martonne. Trois types de climats ont été identifiés et comparés à la carte de clustering établie en utilisant la méthode K-Means. L'évaluation de la précision a été effectuée en utilisant 500 points choisis au hasard en utilisant l'outil ESRI ArcGIS Compute Confusion Matrix. Le tableau 34 présente la matrice de confusion comparant le clustering avec l'indice d'aridité de De Martonne. Dans la zone 1, sur un total de 150 points établis comme vérité terrain, 83 points sont en accord avec la classification, ce qui représente une précision globale de 55%. Dans la zone 2, sur les 102 points établis comme vérité de terrain, 102 points étaient d'accord avec la classification, ce qui a donné une précision globale de 100%. Dans la zone 3, sur un total de 248 points établis comme vérité de terrain, 211 points étaient d'accord avec la classification, ce qui représente une précision globale de 85% (précision globale = 79%, coefficient de Kappa = 0,68).



Tableau 34 : Évaluation de l'exactitude par matrice de confusion

Classe		Indice d'aridité de De Martonne			Total	Précision de l'utilisateur
		Z1	Z2	Z3		
K-means clustering	C1	83	67	0	150	0,55
	C2	0	102	0	102	1
	C3	0	37	211	248	0,85
Total		83	206	211	500	/
Précision du producteur		1	0,495	1	/	0,79

### 3.2. Variation spatio-temporelle du VHI

Les valeurs de VHI représentent la santé globale de la végétation et sont utilisées pour cartographier la sécheresse. Elle sont dérivées en calculant les valeurs de VCI et TCI, La moyenne de VHI de 21 ans a été classée en utilisant la classification donnée par Kogan (2001) pour comprendre la sévérité de la condition de sécheresse dans chaque région du CSM, À cet égard, la distribution de la sévérité des valeurs VHI a été divisée en cinq classes présentées dans le tableau 35, Les conditions de sécheresse variaient dans les quarante-quatre sous-bassins versants.

Tableau 35 : Classes de sécheresse agricole

Classes de sécheresse	VHI values
Extremement sèche	< 10
Sécheresse sévère	10-20
Sécheresse modérée	20-30
Sécheresse légère	30-40
Pas de sécheresse	> 40

#### 3.2.1. Analyse des cartes VHI de la zone 1

La distribution spatio-temporelle des valeurs VHI dans la zone 1, située au nord de la zone d'étude pendant 21 ans (2000 à 2020), montre des valeurs moyennes entre 0 à 100% (figure 76). Cette zone n'a pas connu de sécheresse pendant toute la période, avec des zones ne dépassant pas 0,04% pour les trois classes de sécheresse (sécheresse extrême, sécheresse sévère et sécheresse modérée). Des conditions de sécheresse légère ont été observées dans certaines zones allant de 0,08% (en 2008) à 7,37% (en 2005) à travers la zone. La classe "Pas de

sécheresse" a été observée dans toute la zone, couvrant plus de 92,61% (en 2005) et 99,91% (en 2008) de la superficie totale.

Ainsi, la première zone ne montre aucun signe de sécheresse, comme indiqué par la distribution spatio-temporelle de la classe "Pas de sécheresse". Cette classe couvre plus de 92% de la superficie totale de cette zone et reste seulement une petite place inférieure à 8% pour la classe "Légère sécheresse".

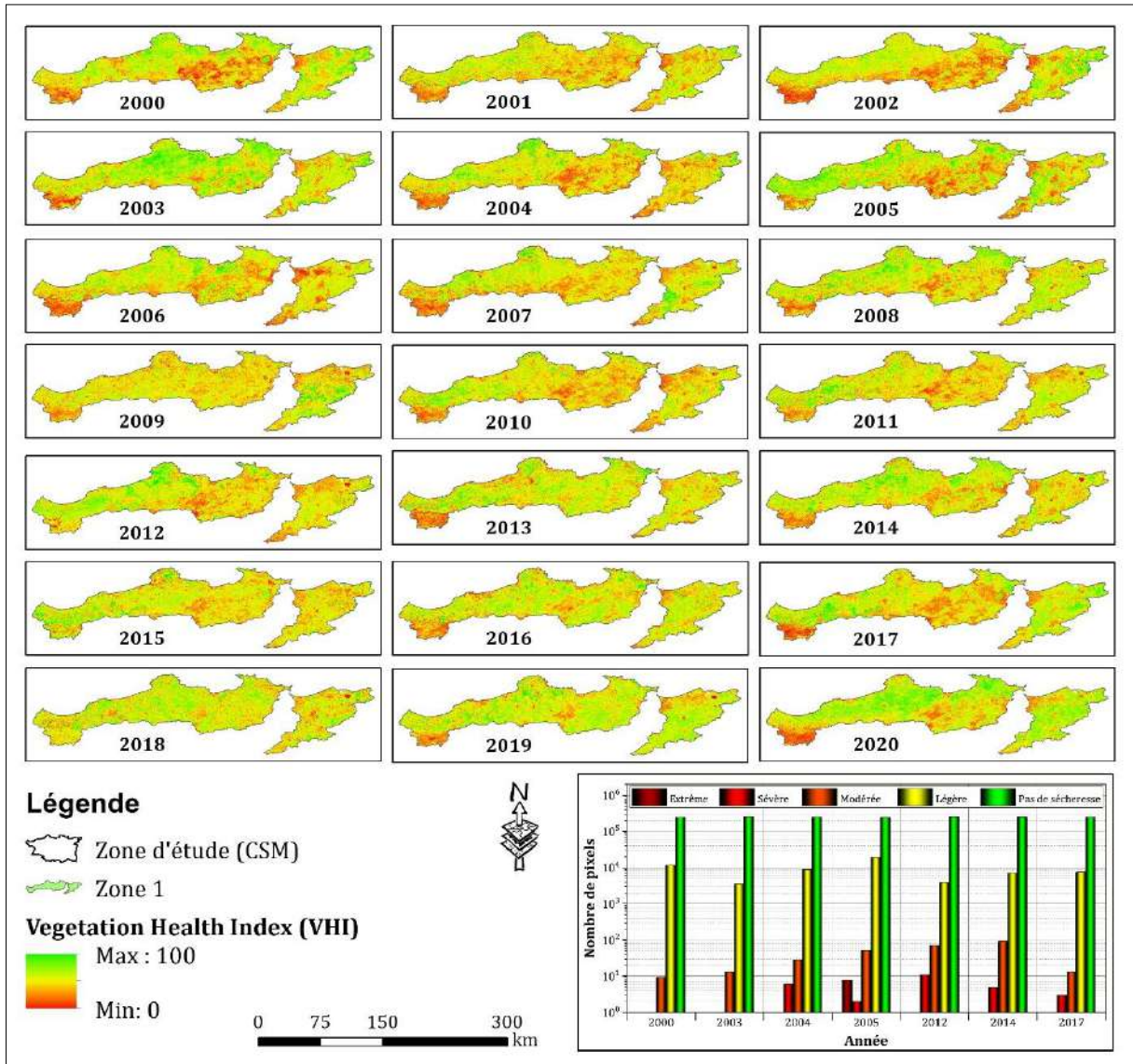


Figure 76 : Variabilité spatio-temporelle du VHI dans la zone 1 (2000-2020)

### 3.2.2. Analyse des cartes VHI de la zone 2

Les valeurs moyennes de VHI dans la zone centrale, située au sud de la première zone, sont été réparties entre 20,77 et 72,30% (figure 77). Cette deuxième zone ne présente pas de sécheresse pour toute la période d'étude dans les classes de sécheresse "Sécheresse extrême" et "Sécheresse sévère", mais la classe de sécheresse "Sécheresse modérée" apparaît dans des zones ne dépassant pas 0,1%. La classe de sécheresse légère est observée dans toute la zone, avec des

zones allant de 0,39% (en 2008) à 32,88% (en 2005). La classe "Pas de sécheresse" est observée dans toute la zone, couvrant de 67,11% (en 2005) à 99,61% (en 2008) de la superficie totale. Ainsi, la deuxième zone ne montre aucun signe de sécheresse, comme indiqué par la distribution spatiale et temporelle de la classe "Pas de sécheresse". Cette classe représente plus de 92% de la superficie totale de cette zone pour les années 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019 et 2020. Cependant, il y a une augmentation de la classe "Légère sécheresse" dépassant 20% pour les années 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2012, 2014 et 2017.

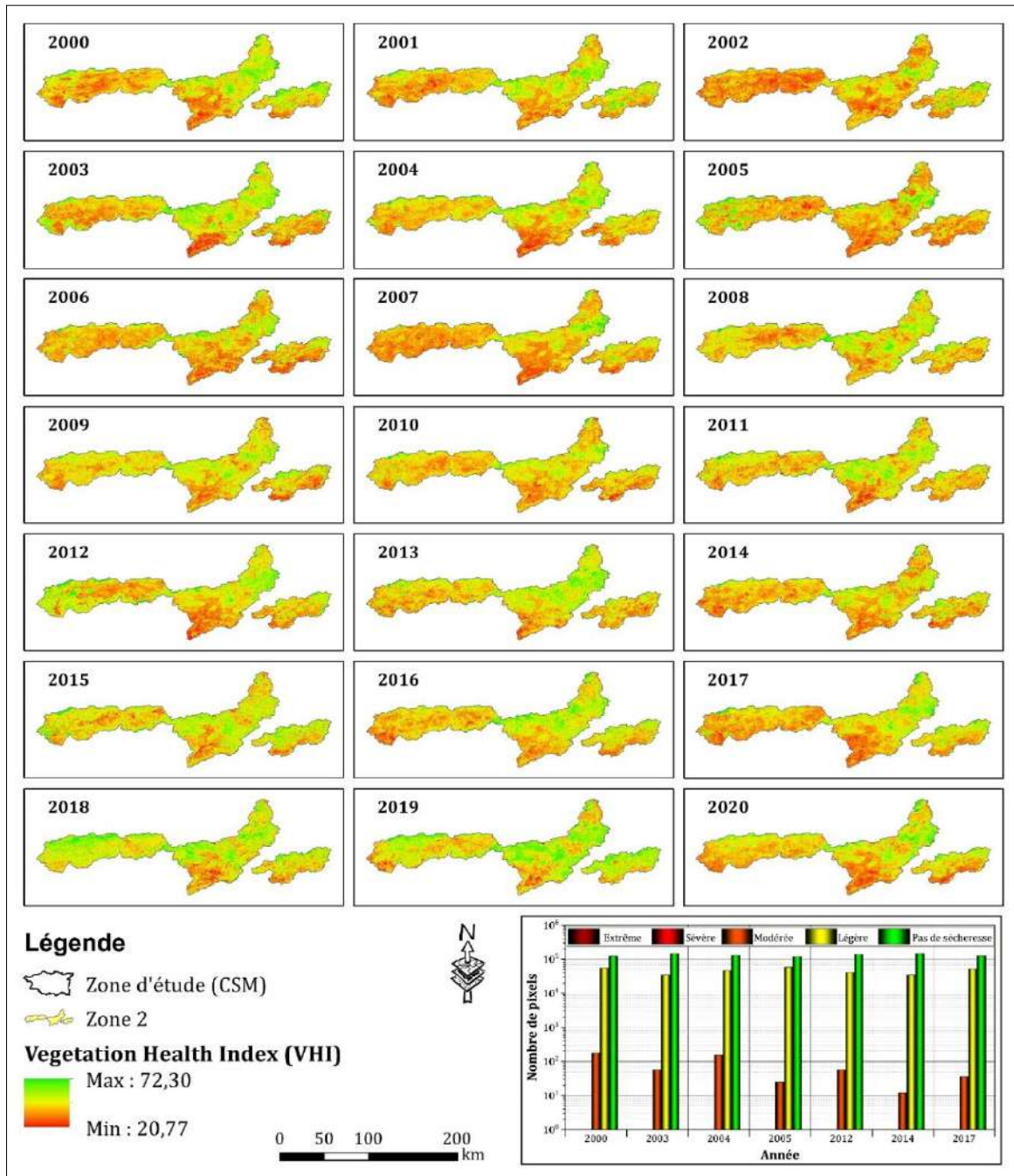


Figure 77 : Variabilité spatio-temporelle du VHI dans la zone 2 (2000-2020)

### 3.2.3. Analyse des cartes VHI de la zone 3

La distribution spatiale et temporelle des valeurs moyennes annuelles de VHI dans la zone 3, située au sud de la zone d'étude, est répartie entre 8,26% et 74,71% (figure 78).

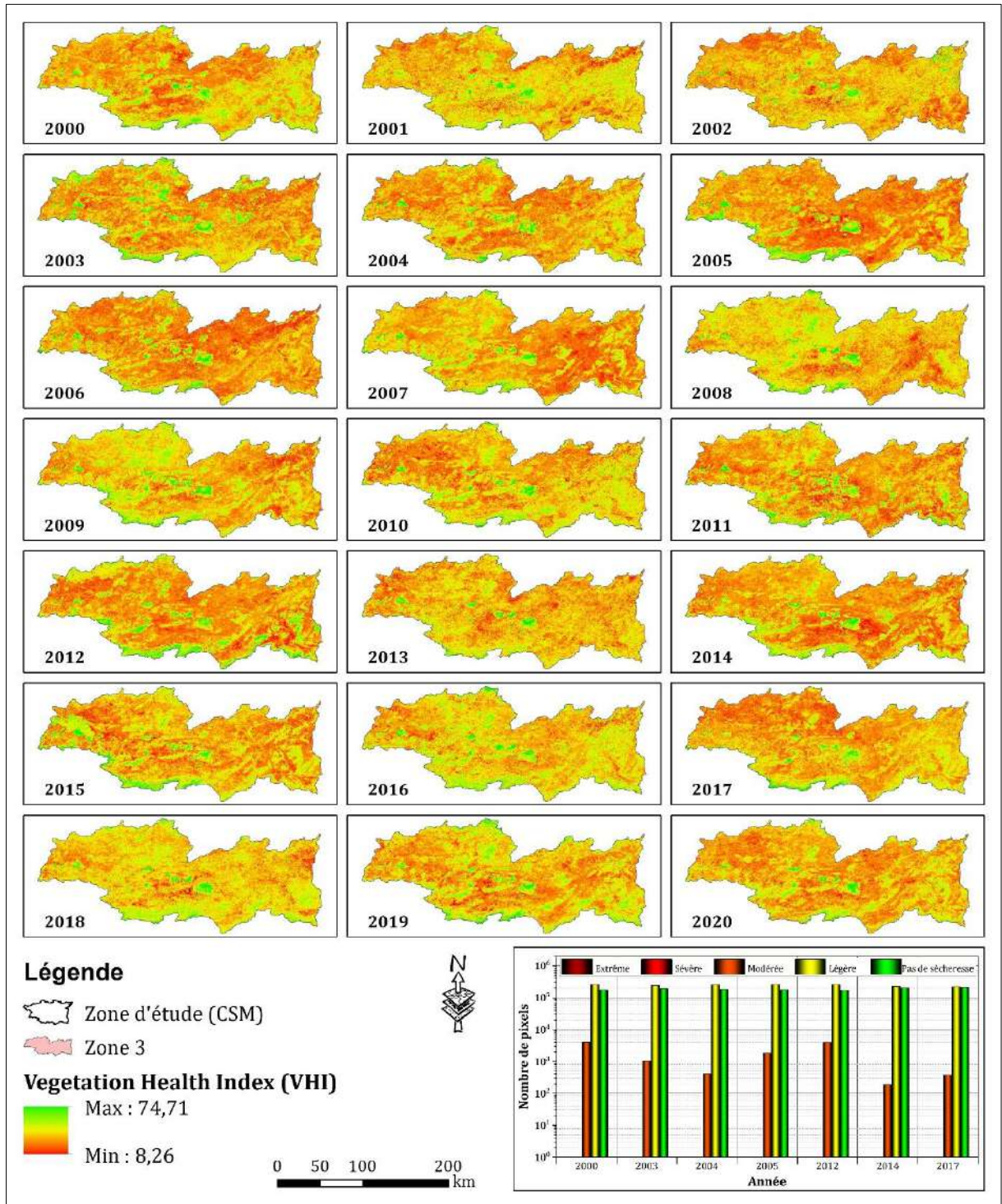


Figure 78 : Variabilité spatio-temporelle du VHI dans la zone 3 (2000-2020)

Cette troisième zone ne présente pas de "Sécheresse extrême" ou "Sécheresse sévère" pendant toute la période d'étude, mais la classe "Sécheresse modérée" apparaît dans des zones ne dépassant pas 1%. La classe "Sécheresse légère" est observée avec une augmentation de la superficie par rapport aux zones précédentes, allant de 6,48% (en 2018) à 59,91% (en 2012) à

travers la zone. La classe "Pas de sécheresse" est observée avec une diminution de la superficie par rapport aux zones précédentes, allant de 39,18% (en 2012) à 93,52% (en 2018) à travers la zone 3.

Par conséquent, la troisième zone montre uniquement une légère indication de sécheresse, telle que déterminée par la distribution spatiale et temporelle de la classe "Légère sécheresse" en alternance avec la classe "Pas de sécheresse". Cette dernière représente plus de 80% de la superficie totale de cette zone pour les années 2008, 2009, 2010, 2013, 2018 et 2019. En conséquence, il y a une augmentation de la classe "Sécheresse légère" dépassant 20% pour les années 2001, 2002, 2006, 2007, 2011, 2015, 2016 et 2020. De plus, cette classe continue d'augmenter en dépassant 50% pour les années 2000, 2003, 2004, 2005, 2012, 2014 et 2017.

### 3.3. Classification de la sévérité de la sécheresse

La fréquence des événements secs et humides pour chaque classe de sécheresse et d'humidité pour la zone d'étude montre que la présence de sécheresse est mentionnée par la classe "Sécheresse Légère" avec un pourcentage supérieur à 30% correspondant aux années 2000, 2003, 2004, 2005, 2012, 2014 et 2017 (Figs, 7, 8 et 9).

Les résultats de la classification par clustering ont montré que la zone C1 correspond pratiquement à l'absence de signe de sécheresse, avec 98% de la classe "Pas de sécheresse" et le reste (2%) pour la classe "Légère sécheresse". Il y a une augmentation de cette dernière à 14% dans la zone C2, puis cette classe continue à augmenter jusqu'à atteindre 33,19% dans la zone C3. Cette évolution spatiale montre une augmentation claire de la sécheresse du nord au sud le long des 3 clusters. Cette distribution coïncide avec la classification climatique de De Martonne avec peu de confusion entre la première classe (Humide) et la deuxième classe (Sub-humide), tandis que la troisième classe (Semi-aride) ne montre aucune confusion avec les autres classes.

La sécheresse identifiée dans une zone climatique n'est souvent pas identifiée dans une autre région climatique, ou elle est identifiée avec une sévérité différente. La propagation de la sécheresse est principalement affectée par les caractéristiques des bassins versants. Le cluster C3 correspond à la zone la plus affectée par la classe "Sécheresse Légère" qui dépasse parfois 50% de la surface totale de la zone, notamment pour les années 2000, 2003, 2004, 2005, 2012, 2014 et 2017. Ces années montrent un taux dépassant les 2/3 des sous-bassins à l'exception de l'année 2017, qui ne montre que 1/3 des sous-bassins touchés par la sécheresse. Ainsi, les sous-bassins de cette zone dépassent 50% des années affectées par la sécheresse à l'exception de 4 sous-bassins (SW22, SW36 et SW38) (figure 79), dont les trois premiers ont un taux de 42,86% et un sous-bassin (SW23) ne présente aucune année sèche.

Une comparaison entre le VHI (figure 76) et la carte de l'occupation du sol (figure 5) montre que la couverture végétale, en particulier la classe forestière, dans les parties nord de la zone d'étude, est plus élevée que dans les autres parties en raison de précipitations plus importantes. Ce résultat montre une très bonne réponse du VHI au stress de la sécheresse.

En résumé, les séquences de propagation de la sécheresse peuvent différer, même au sein d'un même bassin. Les variations de la couverture végétale sont influencées par les conditions climatiques. Le cluster C1, correspondant à la zone humide, présente un taux de couverture forestière dépassant 49% de sa surface totale. Cependant, en se déplaçant vers le sud, le cluster C2, qui coïncide avec la zone subhumide, montre une diminution de la couverture forestière, représentant seulement 12% de sa surface totale. En se déplaçant plus au sud, la couverture forestière diminue encore pour représenter seulement 6% de la superficie totale du cluster C3, correspondant à la zone semi-aride.

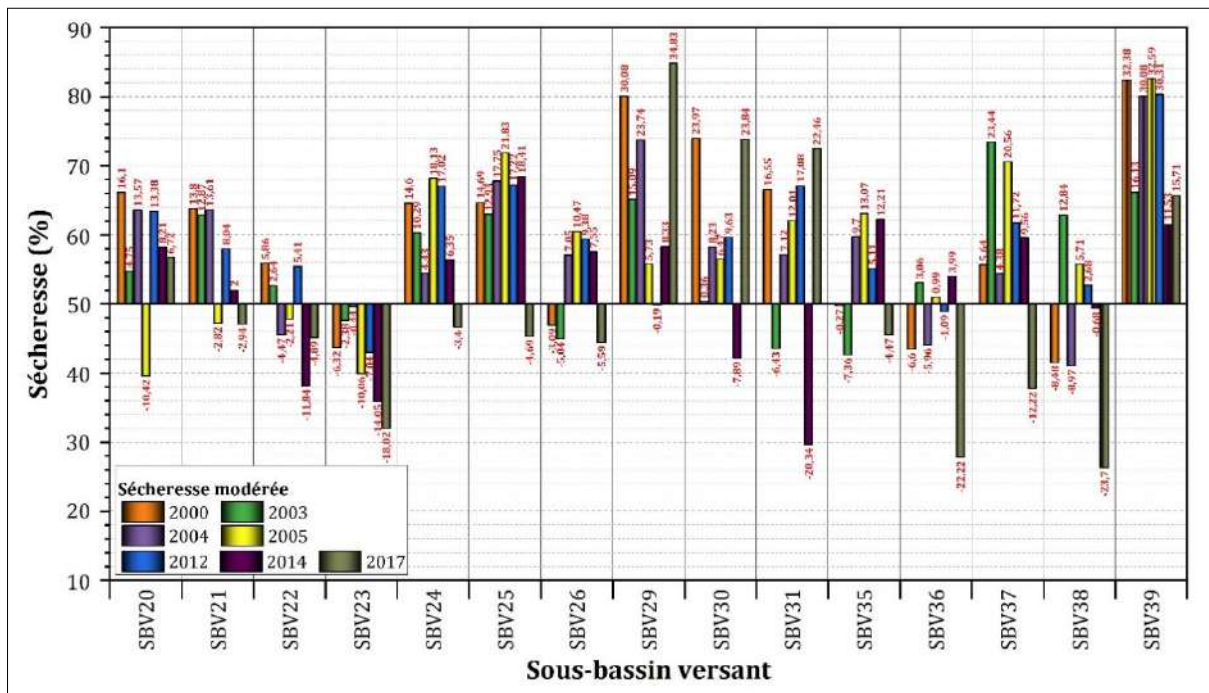


Figure 79 : Variabilité temporelle du VHI dans la zone 3 (2000-2020)

#### 4. Conclusion

La variation spatio-temporelle et la régionalisation de la sécheresse dans le bassin versant du Constantinois Seybouse-Mellegue (Nord-Est de l'Algérie) pendant les années 2000 à 2020 ont été effectuées en utilisant le calcul de l'indice de santé de la végétation (VHI) dérivé du spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée (MODIS) et la méthode des clusters K-Means. Les résultats des clusters ont révélé l'existence de trois sous-régions présentant des modèles spatiaux différents de la variabilité de la sécheresse.

La distribution spatiale et temporelle des valeurs moyennes annuelles de VHI dans le CSM indique que la région C3 est la plus affectée par la sécheresse.



# *Conclusion générale*



## **Conclusion générale**

La région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM) est située au Nord-est algérien et couvre une superficie de 43768,44 km<sup>2</sup>. La zone d'étude comprend une variété de conditions climatiques, allant de l'humide au nord, à semi-aride au sud. L'étude de la variabilité spatiotemporelle des pluies réalisée sur une période de 50 ans dans l'ensemble du Nord-Est de L'Algérie, montre une forte hétérogénéité concernant leur répartition spatiale. Elle diminue du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest. L'analyse des variations du coefficient pluviométrique, montre que le nombre des années déficitaires est presque identique aux années excédentaires. La pluviométrie annuelle a varié de façon notable au cours des cinq dernières décennies, depuis la décennie 1981-1991 jusqu'à la décennie 2011-2021.

Cette étude a évalué avec succès les tendances et la cartographie des événements de sécheresse dans la région hydrographique Constantinoise-Seybouse-Mellegue (CSM). L'évaluation de la sécheresse dépend de la méthodologie utilisée dans l'analyse. Par conséquent, cette étude a eu l'intention d'utiliser deux types de données (les données météorologiques et les données de télédétection). La détection de la sécheresse au niveau des stations montre que les deux indices SPI et RDI seraient utiles et ont révélé être plus sensibles à la sécheresse, et la température est un paramètre important dans la caractérisation de la sécheresse. La comparaison des deux indices, montre un comportement cohérent et similaire.

Cette méthode de travail a permis d'observer aussi la variation de l'intensité de la sécheresse sur le territoire agricole. L'intensité de la sécheresse variait considérablement dans le temps et dans l'espace. Des épisodes de sécheresses exceptionnelles ont été détectés au niveau du bassin versant de la Medjerda. Par conséquent, il existe une similarité entre les méthodes traditionnelles et de télédétection, Cela montre l'utilité de la télédétection pour améliorer l'information sur les zones difficiles d'accès ou avec une faible disponibilité de données météorologiques conventionnelles pour la surveillance de la sécheresse.

La régionalisation de la sécheresse a été obtenue en appliquant le clustering K-means avec le VHI, Les résultats des clusters ont montré l'existence de trois sous-régions ayant des modèles spatiaux différents de la variabilité de la sécheresse. La première composante a identifié le secteur nord de la zone 1, marqué par l'humidité et avec la précipitation annuelle élevée, Cette zone n'a pas connu de sécheresse pendant toute la période, avec des zones ne dépassant pas 0,04% pour les trois classes de sécheresse (sécheresse extrême, sécheresse sévère et sécheresse modérée). La classe de non-sécheresse a été observée à 92,61% et 99,91% dans l'ensemble des zones en 2005 et 2008 respectivement, Ainsi, la première zone ne montre aucun signe de sécheresse, ce qui a été



déterminé par la distribution spatio-temporelle de la classe "Pas de sécheresse", La deuxième composante a identifié la zone centrale, caractérisée par un climat sub-humide. Cette deuxième zone ne montre pas de sécheresse pendant toute la période d'étude pour les classes de sécheresse "Sécheresse extrême" et "Sécheresse sévère", mais la classe de sécheresse "Sécheresse modérée" se produit avec des zones ne dépassant pas 0,1%. La troisième composante a identifié le secteur sud de la zone 3, caractérisée par un climat semi-aride. La classe "Pas de sécheresse" a été observée avec une diminution de la superficie, par rapport aux zones précédentes, allant de 39,18% (en 2012) à 93,52% (en 2018) à travers la zone 3. La classe "Sécheresse légère" a été observée avec une augmentation de la superficie, par rapport aux zones précédentes, une plus grande zone de sécheresse a été observée en 2012 par rapport aux autres années.

Dans l'ensemble, cette étude démontre que non seulement les indices de sécheresse météorologiques sont sensibles aux facteurs de stress liés à la sécheresse, mais aussi l'indice de sécheresse agricole (VHI) dérivé de MODIS est fiable et nous aide à surveiller la dynamique de la sécheresse à une échelle régionale et spécifiquement à comprendre la sécheresse passée dans cette région semi-aride, et peut améliorer la gestion future des ressources en eau pour les secteurs agricoles et d'autres besoins socio-économiques. L'algorithme K-means est applicable à la fusion spatio-temporelle de la VHI sur le bassin versant. La distribution spatiale et temporelle des valeurs moyennes annuelles de VHI dans la zone 3 a révélé la plus faible variabilité de la variance, indiquant que cette région est la plus affectée par la sécheresse. La régionalisation de la carte de la sécheresse a été validée en utilisant les relations entre l'IDM et les zones de regroupement. La précision globale de 79% de la matrice de confusion a été considérée comme bonne. Les caractéristiques de la sécheresse sont vitales pour la planification et la gestion des ressources en eau dans les bassins fluviaux (Wambura 2020). Le climat en Algérie devrait être plus chaud et plus sec. Plusieurs questions restent sans réponse et doivent être étudiées, en particulier dans les régions exposées à un risque élevé de sécheresse sévère, comme les pays de la région méditerranéenne. Notre recherche représente un pas en avant dans l'amélioration de l'efficacité du VHI dans la surveillance de la sécheresse et la détection des zones les plus exposées aux risques de dégradation de la végétation et de diminution du rendement des cultures. Nous espérons que cette étude pionnière incitera les scientifiques à utiliser ces méthodes appliquées à la sécheresse agricole avec d'autres méthodes (sécheresse météorologique) dans des études futures. Par conséquent, nous proposons le développement d'un modèle pour la gestion et la planification des ressources en eau et des zones agricoles dans la zone 3. Nos résultats pourraient être utilisés comme base de référence dans l'utilisation d'autres outils tels que le WEAP-Mabia afin d'identifier les besoins réels des cultures, et d'aider les décideurs et les autorités à développer de meilleures stratégies d'atténuation et d'adaptation pour réduire les pertes causées par ces événements.



*Références*  
*Bibliographiques*



## Références bibliographiques

- ABDEDDAIM Hakima, (2018), Contribution a l'étude de l'influence de la structure du reseau hydrographique sur le risque hydrologique « cas des bassins de l'est de l'Algérie ».Thèse de doctorat univ Biskra.260p.
- Abdrabbo et al., 2012 MA Abdrabbo , A. Farag , M. Abul-Soud , MM El-Mola , FS Moursy , II Sadek , FA Hashem , MO Taqi , WMS El-Desoky , HH Shawki Utilisation de l'imagerie satellitaire pour la surveillance de la sécheresse en Égypte.
- ABH (2013) Presentation de la region Constantinois–Seybousse-Mellegue en general, et le bassin de la seybousse en particulier.
- Abramowitz M, Stegun A (1965) Handbook of mathematical formulas, graphs, and mathematical tables, Dover Publ New York 470.
- Akram F, Rasul MG, Khan MMK, Amir MSII (2012) Automatic delineation of drainage networks and catchments using DEM data and GIS capabilities: a case study.18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia p.4.
- Ali S, Haixing Z, Qi M, Liang S, Ning J, Jia Q, Hou F (2021) Monitoring drought events and vegetation dynamics in relation to climate change over mainland China from 1983 to 2016. *Environ Sci Pollut R* 28(17):21910–21925. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12146-4>.
- ANRH (1993) Plan de développement 2010, Alge.
- Bagnouls, f., et Gaussen H, (1957) : Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 66° année, N." 335:193-22.
- Beaudin I (2007) Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen. Université Laval, Rapport de Maîtrise en Sciences Géomatiques, p 233.
- BECHIRI Naouel, (2011), Evolution du chimiste des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de la Seybousse (Nord-Est algérien). Thèse de Dr univ. Annaba. 100p.
- Bekkoussa B, Meddi M, Jourde H (2008) Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride: cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 18(3):173–184.
- Ben Abdelmalek M, Nouri I (2020) Study of trends and mapping of drought events in Tunisia and their impacts on agricultural production. *Sci Total Environ* 734:139311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139311>.
- Bessaklia H, Ghenim A, Megnounif A, Martin-Vide J (2018) Spatial variability of concentration and aggressiveness of precipitation in North-East of Algeria. *J Water Land Dev* 36:3–15. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0001>.
- Bisht G, Venturini V, Islam S, Jiang LE (2005) Estimation of the net Radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days, *Remote Sens Environ* 97(1):52–67.
- Boudiaf B, Dabanli I, Boutaghane H, Şen Z (2020) Temperature and precipitation risk assessment under climate change effect in Northeast Algeria. *Earth Syst Environ* 4(1):1–14. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00136-7>.
- Bouillin, J. P., & Raoult, J. F. (1971). Présence sur le socle kabyle du Constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs; le Numidien peut-il être un néo-autochtone?. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3-4), 338-362.

- Bouznad IE, Guastaldi E, Zirulia A, Brancale M, Barbagli A, Ben- gusmia D (2020) Trend analysis and spatiotemporal prediction of precipitation, temperature, and evapotranspiration values using the ARIMA models: case of the Algerian Highlands. Arab J Geosci 13:1281. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06330-6>.
- Cammalleri C, Verger A, Lacaze R, Vogt JV (2019) Harmonization of GEOV2 fAPAR time series through MODIS data for global drought monitoring. Int J Appl Earth Obs 80:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.017>.
- Chary GR, Vittal KPR, Venkateswarlu B, Mishra PK, Rao GGSN, Pratibha G, Rao KV, Sharma KL, Rao GR (2010) Drought hazards and mitigation measures. In: Jha MK (ed) Natural and anthro- pogenic disasters: vulnerability, preparedness and mitigation. Springer, The Netherlands, pp 197–236. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2498-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2498-5_10).
- Cunha APMA, Zeri M, Leal KD, Costa L, Cuartas LA, Marengo JA, Tomasella N J, Vieira RM, Barbosa AA, Cunningham C, Cal Garcia JV, Broedel E, Alvalá R, Ribeiro-Neto G (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. Atmosphere 10(11):642–649. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.
- DE MARTONNE E., 1926. Aréisme et indice d'aridité. Compt. Rend. de l'Acad. Sci, Paris n.182, p. 1396-1398.
- Dhakar R, Sehgal VK, Pradhan S (2013) Study on inter-seasonal and intra-seasonal relationships of meteorological and agricultural drought indices in the Rajasthan State of India. J Arid Environ 97:108–119. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.06.001>.
- Dikshit A, Pradhan B, Assiri ME, Almazroui M, Park HJ (2022) Solving transparency in drought forecasting using attention models. Sci Total Environ 837:155856.
- DUCHAUFOR, Ph., 1975. Atlas écologique des sols du monde. Ed.Masson. pp 11- 92.
- Durand D.M., 1969. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la BERBERIE. Bull.,Serv. Carte Géol., Algérie, N. S., 39 : 89-131.
- Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. Recueil Trav. Lab. Bot. Geol. Zool. Univ. Fac. Sci. Montpellier, 7(3.43).
- ESA (2020) WorldCover Product User Manual | V 1 . 0. Tech. Rep. Available at. [https://worldcover2020.esa.int/data/docs/WorldCover\\_PUM\\_V1.1.pdf](https://worldcover2020.esa.int/data/docs/WorldCover_PUM_V1.1.pdf). Accessed 27 Oct 2021.
- Farah Abdelhafid Karim, (2014), Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Mémoire de Magister univ Constantine.109p.
- Gelard J. P., 1979. Géologie du Nord-Est de la grande de Kabylie (Un segment interne de l'orogène littoral nord- africain). Thèse S C. Dijon. 326 p, 98 Fig, 19 PL. 1 carte h.t .couleur.
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebego, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2018). Using Drought Indices to Model the Statistical Relationships Between Meteorological and Agricultural Drought in Raya and Its Environs, Northern Ethiopia. Earth Systems and Environment, 2(2), 265–279. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0055-9>.
- Girard M,C, & Girard C,M, 1999, Traitement des données de télédétection, DUNOD Ed, Paris, pages 328 à 333.
- GRAVELIUS, H. (1914): Grundrib der gesamten Gewässerkunde, Band I: Flubkunde (kompendium of Hydrology, vol. I. Revers, in German). Göschen, Berlin, Germany.
- GUECHI Salima, (2017), Cartographie Des Pluies Extremes Du Nord-Est Algerien. Thèse de Dr univ. Annaba. 234p.

- Hennessy, K., Fawcett, R., Kirono, D., Mpelasoka, M., Jones, D., Bathols, J., Whetton, P., Stafford Smith, M., Howden, M., Mitchell, C., & Plummer, N. (2008). An assessment of the impact of climate change on the nature and frequency of exceptional climatic events. Australian Government, Bureau of Meteorology. December 2013. <http://www.oisaweb.es/documents/10148/30643/Impact+of+climate+change+on+the+nature+of+excepcional+climatic+events.pdf>.
- Hoque MA-A, Pradhan B, Ahmed N, Ahmed B, Alamri AM (2021) Cyclone vulnerability assessment of the western coast of Bangladesh. *Geomat Nat Haz Risk* 12(1):198–221. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1867652>.
- HORTON R,A,, 1945, Erosional development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical approach to Quantitative Morphology, *Geo, Soc, America Bull*, Vol, 56 p, 275-370.
- Huete, AR, Jackson, RD, et Post, DF (1985), Réponse spectrale d'un couvert végétal avec différents fonds de sol, *Remote Sens, Environ*, 17: 37-53.
- Jackson, RD et Huete, AR (1991), Interprétation des indices de végétation, *J, Preventative Vet, Med*, 11: 185-200.
- Jiao et al., 2019 W. Jiao, C. Tian, Q. Chang, K.A. Novick, L. Wang A new multi sensor integrated index for drought monitoring *Agric. For. Meteorol.*, 268 (2019), pp. 74-85, 10.1016/j.agrformet.2019.01.008.
- Justice CO, Vermote E, Townshend JR, Defries R, Roy DP, Hall DK et al (1998) The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research, *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 36(4):1228–1249.
- Khatir Nadia, (2019), Les techniques de clustering dédiées aux données multimédia, Th, Doctorat, Univ, D'Oran , 181p.
- Kogan F, Guo W (2015) 2006–2015 mega-drought in the western USA and its monitoring from space data. *Geomat Nat Haz Risk* 6(8):651–668. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1079265>.
- Kogan FN (1995) Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv Spac Res* 15(11):91–100.
- Kogan FN (1997) Global drought watch from space. *Am Meteorol Soc Bull* 78:621–636.
- Kogan FN (2000) Contribution of remote sensing to drought early warning. In: Wilhite DA, Sivakumar MVK, Wood DA (eds) Early warning systems for drought preparedness and drought management. Proceedings of an Expert Group Meeting held 5–7 September, 2000, in Lisbon, Portugal, vol 57. World Meteorological Organization, Geneva, pp 86–100.
- Kogan FN (2001) Operational space technology for global vegetation assessment. *B Am Meteorol Soc* 82:1949–1964.
- Laib Assia, (2015), L'impact du changement climatique sur les hydrosystemes Constantinois mémoire de majister univ Constantine.131p.
- Lloyd-Hughes B, Saunders MA (2002) A drought climatology for Europe, *Int J Climatol* 22:1571–1592, <https://doi.org/10.1002/joc.846>.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1–4), 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>.

- Louati Brahim, (2020), Etude d'impact des effluents industriels dans le bassin versant d'oued Seybouse. Thèse de doctorat univ Annaba. 199p.
- MacQueen, James et al, Some methods for classification and analysis of multivariate observation, In Proceeding of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, volume 1, pages 281-297, Oakland, CA, USA, 1967.
- Marre A., 1992. Le Tell oriental algérien : de Collo à la frontière tunisienne. Etude géomorphologique. OPU, Alger, 624 p.
- Marufah U, Hidayat R, Prasasti I (2017) Analysis of relationship between meteorological and agricultural drought using standardized precipitation index and vegetation health index. IOP Conf Ser: Environ Earth Sci 54(1):012008 (IOP Publishing).
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society Boston 17(22):179–183.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, pp 179–184.
- Mebarki, A., (2005). Hydrologie des bassins de l'Est Algérien. Ressource en eau, aménagement et environnement, PhD Thesis, University of Constantine, 360 p.
- Meddi H, Meddi M (2007) Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. Géographia technica 2:49–55.
- Meddi M, Assani AA, Meddi H (2010) Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, northwestern Algeria. Water Resour Manage, n.24.
- Meddi M, Hubert P (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions. IAHS 278:1–7.
- Meddi M, Talia A (2007) Pluviometric regime evolution in the north of Algeria. Arab Gulf J Sci Res 26:152–162, 01/2008.
- Medjerab A (2005) Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie Nord-Occidentale. Revue géographique de l'Est, vol. 45 / 2 | 2005 | Climat, sécheresse et canicule.
- Merabti A, Meddi M, Martins DS, Pereira LS (2017) Comparing SPI and RDI applied at local scale as influenced by climate. Water Resour Manag 32(3):1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1855-7>.
- Merabti, A., Meddi, M., Martins, D. S., & Pereira, L. S. (2017). Comparing SPI and RDI Applied at Local Scale as Influenced by Climate. Water Resources Management, 32(3), 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1855-7>.
- Mishra AK, Desai VR (2005) Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India, Int J River Basin Manag 3:31–41, <https://doi.org/10.1080/15715124.2005.9635243>.
- Mishra AK, Singh VP (2010) A review of drought concepts. J Hydrol 391(1–2):202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.
- Miyan, M, A, (2015), Droughts in Asian least developed countries: vulnerability and sustainability, Weather and Climate Extremes, 7, 8-23.
- Mladenova et al., 2014 I.E. Mladenova, T.J. Jackson, E. Njoku, R. Bindlish, S. Chan, M.H. Cosh, T.R.H. Holmes, R.A.M. de Jeu, L. Jones, J. Kimball Remote monitoring of soil

- moisture using passive microwave-based techniques—Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E.
- Mrad, D., Djebbar, Y., & Hammar, Y. (2018). Analysis of trend rainfall: Case of North-Eastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 36(1), 105–115. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0011>.
  - MUSY A. et LAGLAINE V. (1992) : Hydrologie générale. Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration, EPFL, Lausanne.
  - Narita H., Sawamura Y., Hayashi A., « Learning a Kernel Matrix for Time Series Data from DTW Distances », p, 336-345, 2008.
  - NEDJRAOUI, D., 2003. profil fourrager <<Algérie >>Rapport FAO 2003 pp8. Disponible ici : <http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/PDF%20files/Algeria-French.pdf>.
  - Organisation météorologique mondiale, 2012: Guide d'utilisation de l'indice de précipitation normalisé (OMM-N° 1090).
  - Orimoloye, I, R., Belle, J, A., & Ololade, O, O, (2021) Drought disaster monitoring using MODIS derived index for drought years: A space-based information for ecosystems and environmental conservation, *Journal of Environmental Management*, 284, 112028, doi:10.1016/j.jenvman.2021.112028.
  - Palmer WC (1965) Meteorological drought, In: U,S, Weather Bureau Res, Pap, No, 45 (p, 58), <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>, Accessed 23 Oct 2019.
  - Park JS, Kim KT, Choi YS (2008) Application of vegetation condition index and standardized vegetation index for assessment of spring drought in South Korea. *Int Geosci Remote Sens Sympo- sium (IGARSS)* 3(1):774–777. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779463>.
  - Raoult J F., 1974 : Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord - Constantinois, Algérie).
  - Raoult, J.F., 1969c. Relations entre la Dorsale kabyle et les flyschs sur la transversale du Djebel Rhedir ; phases tangentielles éocènes, paléogéographie (Nord du Constantinois, Algérie). *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. XI, p. 523-543.
  - Rebello, V, P, A., Getirana, A., Lakshmi, V., & Rotunno Filho, O, C, (2017), Monitoring drought in Brazil by remote sensing, *Remote Sensing of Hydrological Extremes*, 197-218.
  - Roche, M, (1963), Hydrologie de surface, Gauthier-Villars, Paris, 429 pages.
  - Rouabhia. A K (2006)- Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod, Nord-Est algérien. Thèse doctorat. UBM Annaba, Algérie. 160P.
  - Ruiz E, V., Casacuberta F., Segovia H, R., « Is the DTW "distance" really a metric ? An algorithm reducing the number of DTW comparisons in isolated word recognition, », *Speech Communication*, vol, 4, n° 4, p, 333-344, 1985.
  - Sakoe H and Chiba S, A dynamic programming approach to continuous speech recognition, In *Proceedings of the Seventh International Congress on Acoustics*, volume 3, pages 65–69, 1971.
  - Sakoe, H., & Chiba, S. (1978). Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 26(1), 43-49.

- Sandeep P, Obi Reddy GP, Jegankumar R, Arun Kumar KC (2021) Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets.
- Schilling J, Hertig E, Trambly Y, Scheffran J (2020) Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Reg Environ Change* 20(1):12. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>.
- Schneider, B., Ehrhart, M, G., & Macey, W, H, (2011), *Organizational climate research, The handbook of organizational culture and climate*, 29, 12169-012.
- SELTZER P., (1946) – *Le climat d’Algérie*. Trainst. Métiorol. Phys. Globe, Alger, 1 vol. 219 p.
- Senamaw A, Addisu S, Suryabhadgavan KV (2021) Mapping the spatial and temporal variation of agricultural and meteorological drought using geospatial techniques. *Ethiopia Environ Syst Res* 10:15. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00204-2>.
- Slatni I., (2014). *Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution*. Mémoire de Magister en chimie physique et analytique, Université de M Cherif Messaadia Soug Ahras.
- Smith K.G. (1950). Standards for grading textures of erosional topography. *American Journal Science* Vol. 48, pp. 655- 668.
- Strahler, A. N. (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: V.T. Chow(Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw hill, New York,pp.39-76.
- Sur C, Hur J, Kim K, Choi W, Choi M (2015) An evaluation of satel- lite-based drought indices on a regional scale. *Int J Remote Sens* 36(22):5593–5612. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101653>.
- Swain, S., Wardlow, B. D., Narumalani, S., Tadesse, T., & Callahan, K. (2011). Assessment of vegetation response to drought in Nebraska using Terra-MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index. *GIScience & Remote Sensing*, 48(3), 432-455.
- Taibi S, Souag D (2011) Regionalization of drought in Northern Algeria using a standardized precipitation index (1936–2010). In: *From prediction to prevention of hydrological risk in Mediterranean countries* (E. Ferrari & P. Versace, Sci. Eds), 4th international workshop on hydrological extremes MEDFRIEND group, University of Calabria; EdiBios, Cosenza, Italia; 169–182.
- Thom HCS (1958) A note on gamma distribution, *Mon Weather Rev* 86: 117–122.
- THORNTHWAITE C.W. 1948. An approach toward arational classification of climate. *Geogr. Rev.*,38, 55–94.
- Trambly Y, Koutroulis A, Samaniego L, Vicente-Serrano SM, Vol- aire F, Boone A, Le Page M, Llasat MC, Albergel C, Burak S, Cailleret M, Kalin KC, Davi H, Dupuy JL, Greve P, Grillakis M, Hanich L, Jarlan L, Martin-StPaul N, Polcher J (2020) Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Sci Rev* 210:103348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>.
- Tsakiris G, Vangelis H (2005) Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Eur Water* 9/10:3–11.



- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007), Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), *Water Resources Management*, 21(5), 821–833, <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>.
- Unganai, L. S., & Kogan, F. N. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote sensing of environment*, 63(3), 219-232.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010) A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23(7):1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Vila, J.M., 1980. La chaîne Alpine d'Algérie Orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de doctorat ès Science, Paris VI, 3 Volumes, 655 p.
- Vuori V., Adaptive Methods for On-Line Recognition of Isolated Handwritten Characters, PhD thesis, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland), 2002.
- Wang F, Lai H, Li Y et al (2021) Dynamic variation of meteorological drought and its relationships with agricultural drought across China. *Agric Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107301>.
- West, H., Quinn, N., & Horswell, M. (2019). Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>.
- Wilhite DA (2000) Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite DA (ed) *Drought: a global assessment (volume 1)*. Routledge, London.
- Wilhite DA, Glantz MH (1985) Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int* 10(3):111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>.
- Xie, F., & Fan, H. (2021), Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST): Is data reconstruction necessary? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102352, doi:10.1016/j.jag,2021,102352.
- Yacoub E, Tayfur G (2017) Evaluation and assessment of meteorological drought by different methods in Trarza Region, Mauritania, *Water Resour Manag* 31:825–845, <https://doi.org/10.1007/s11269-0161510-8>.
- Zerouali B, Al-Ansari N, Chettih M, Mohamed M, Abda Z, Santos CAG, Zerouali B, Elbeltagi A (2021) An enhanced innovative triangular trend analysis of rainfall based on a spectral approach. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w13050727>.
- Zhang E, Li H, Huang Y, Hong S, Le Z, Ji C (2021) Practical multi-party private collaborative k-means clustering. *Neurocomputing* 467:256–265. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.09.050>.
- Zhang, A., & Jia, G. (2013). Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>.
- Zheng K, Chen C, Luo G, Gao C (2021) Research of the agriculture drought and association with meteorological drought—a case study of above the Bengbu sluice in the Huaihe River Basin, China. *Theor Appl Climatol* 147:1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03671-4>.