

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMCCEN



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

THESE

Présentée par

DIAF AMINE

En vue de l'obtention du

Diplôme de Docteur en science
En Hydraulique

Thème :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'HYDROLOGIE ET DES TRANSPORTS
SOLIDE - ETUDE DE CAS

Soutenue le, 10 / 05 / 2025, face au jury constitué de :

Présidente	ABDELBAKI Chérifa	Prof.	Université de Tlemcen
Encadreur	GHENIM Abderrahmane Nekkache	Prof.	Université de Tlemcen
Co-encadreur	DJELLOULI Fayçal	M.C.A	C.U. El Bayadh
Examineur	MEGNOUNIF Abdesselam	Prof.	Université de Tlemcen
Examineur	KAZI-TANI Hychem	M.C.A	C.U. Maghnia
Examineur	GUEMOU Bouabdellah	M.C.A	Université d'Ain Témouchent

Année universitaire : 2024 – 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿... وَمَا أُوْتِيْتُمْ مِّنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا﴾

صدق الله العظيم

سورة الإسراء: الآية 85

ملخص

هدف هذا البحث هو تقييم تآكل التربة عن طريق المياه ونقل المواد الصلبة العالقة في حوض وادي لخضر (170 كم²)، الواقع في شمال غرب الجزائر.

وفي سياق دراستنا، نستخدم البيانات الجوية التي جمعتها الوكالة الوطنية للموارد المائية على مدى فترة 52 عامًا. لقد استخدمنا معادلة فقدان التربة العالمية المنقحة RUSLE لتقدير تآكل التربة عن طريق المياه وبعد ذلك، قمنا بتقدير نقل الرواسب في منطقة الدراسة من خلال لقياس مدخلات الرواسب.

وتظهر النتائج أربعة مستويات من تعرض التربة لتآكل التربة عن طريق المياه بمعدل تآكل متوسط يبلغ 8.43 طن للهكتار الواحد سنويًا: المناطق ذات التعرض المنخفض (73%)، والمتوسط (7%)، والعالي (12%)، والعالي جدا (7%). وتشغل مساحة مستجمعات المياه 26% من المناطق ذات القابلية المتوسطة والعالية والشديدة للتآكل، وهو ما يتوافق مع التربة ذات القابلية العالية للتآكل والمنحدر الشديد والغطاء النباتي المنخفض.

وعلاوة على ذلك، تباينت المدخلات الصلبة طوال فترة المراقبة، حيث تم تسجيل الحد الأقصى للمدخلات في عامي 2008 و2009 بمقدار 16294 طنًا سنويًا وتدهور محدد بمقدار 95 طن/كم²/سنة. هذه الأرقام أعلى بنحو 1.5 مرة من المتوسطات السنوية البالغة 12619 طنًا سنويًا و74 طن/كم²/سنة متوسط الكمية السنوية للمواد الصلبة المسجلة في نهاية حوض وادي لخضر، والتي تم تحديدها بـ 12619 طن، يتم تسجيلها بشكل رئيسي خلال فصل الخريف (66%)، ونسبة أقل بكثير في فصل الشتاء (16%)، وفي الربيع (15%) وتقريباً صفر في الصيف (3%). ويمثل هذا متوسط تدهور محدد قدره 74 طن/كم²/سنة.

وأخيراً، قمنا بفحص فئات الفيضانات المختلفة في الحوض من أجل تسليط الضوء على ظاهرة الهستيريسيس. تمت دراسة الفيضانات العشرين التي تم أخذها في الاعتبار في منطقة وادي لخضر باستخدام الرسوم البيانية التي تمثل C كدالة لـ QL. تمثل هذه الرسوم البيانية ثلاثة أنماط من منحنيات الهستيريسيس: في اتجاه عقارب الساعة، وعكس اتجاه عقارب الساعة، ومن بين الفيضانات العشرين التي تم فحصها، فإن تلك التي لها حلقة عكس اتجاه عقارب الساعة والتي يبلغ عددها ثمانية بالنسبة لعلاقة تتميز بتركيزات قصوى وتدفعات عالية بشكل عام.

الكلمات المفتاحية: النقل الصلب، المدخلات السائلة، تآكل التربة عن طريق المياه، RUSLE، المدخلات الصلبة، حوض وادي لخضر، الجزائر.

ABSTRACT

The objective of this research was to assess water erosion and suspended solids transport in the Oued Lakhdar watershed (170 km²), located in northwest Algeria.

In our study, we used meteorological data collected by the ANRH over a period of 52 years. We used the Revision Universal Soil Loss Equation (RUSLE) to estimate water erosion. We then estimated sediment transport in the study area using the ANRH method to quantify sediment inputs.

The results show four levels of soil vulnerability to water erosion, with an average erosion rate of 8.43 tons per hectare per year: low (73%), medium (7%), high (12%), and very high (7%) vulnerability zones. The watershed area is occupied by 26% of areas with medium, high and very high vulnerability to erosion, corresponding to soils with high erodibility, steep slope and low vegetation cover.

Furthermore, solid inputs varied throughout the observation period, with a maximum input recorded in 2008-2009 of 16,294 t/year and a specific degradation of 95 t/ km²/ year. These figures exceed approximately 1.5 times the annual averages which are 12,619 t/year and 74 t/ km²/ year. The average annual quantity of solid matter recorded at the end of the Oued Lakhdar watershed, quantified at 12,619 (t), is mainly recorded during the autumn season (66%), much less in winter (16%), in spring (15%) and almost zero in summer (3%). This represents an average specific degradation of 74 t/ km²/ year.

Finally, we examined the different flood categories in the basin to highlight the hysteresis phenomenon in the (C/Q_L) relationships. The 20 floods considered in the Oued Lakhdar region were studied using graphs representing C versus Q_L. These graphs represent three hysteresis curve models: clockwise, counterclockwise, and figure-eight. Among the 20 floods examined, those with a counterclockwise loop and eight for the (C/Q_L) relationship are characterized by maximum concentrations and generally high flows.

Keywords: water erosion, RUSLE, sediment transport, liquid input, sediment input, Oued Lakhdar watershed, Algeria.

RESUME

L'objectif de cette recherche était d'évaluer l'érosion hydrique et le transport des matières solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar (170 Km²), situé au Nord-Ouest de l'Algérie.

Dans le contexte de notre étude, nous exploitons les données météorologiques collectées par l'ANRH sur une période de 52 ans. Nous avons fait appel à l'équation universelle de révision des pertes en sols (RUSLE) pour estimer l'érosion hydrique. Ensuite, nous avons estimé le transport sédimentaire dans la zone d'étude en appliquant la méthode de l'ANRH pour quantifier les apports sédimentaires.

Les résultats montrent quatre niveaux de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique avec un taux d'érosion moyen de 8,43 tonnes par hectare par an : les zones à vulnérabilité faible (73 %), moyenne (7 %), forte (12 %) et très forte (7 %). La superficie du bassin versant est occupée par 26 % de zones à vulnérabilité moyenne, forte et très forte à l'érosion, correspondant aux sols à érodibilité élevée, à forte pente et à faible couvert végétal.

De plus, les apports solides ont varié tout au long de la période d'observation, avec un apport maximum enregistré en 2008-2009 de 16 294 t/an et une dégradation spécifique de 95 t/ km²/ an. Ces chiffres dépassent environ 1,5 fois les moyennes annuelles qui sont de 12 619 t/an et 74 t/ km²/ an. La quantité moyenne annuelle des matières solides enregistrée à l'extrémité du bassin versant de l'Oued Lakhdar, quantifié à 12 619 (t), est principalement enregistré pendant la saison d'automne (66 %), bien moins en hiver (16 %), au printemps (15 %) et presque nul en été (3 %). Cela représente une dégradation spécifique moyenne de 74 t/ km²/ an.

Enfin, nous avons examiné les différentes catégories de crues dans le bassin afin de mettre en lumière le phénomène d'hystérésis dans les relations (C/Q_L). On étudie les 20 crues prises en compte dans la région de l'Oued Lakhdar en utilisant les graphes représentant C en fonction de Q_L. Ces graphes représentent trois modèles de courbes d'hystérésis : dans le sens horaire, antihoraire et en forme de huit. Parmi les 20 crues examinées, celles qui ont une boucle dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et qui sont huit pour la relation (C/Q_L) sont caractérisées par des concentrations maximales et des flux généralement élevés.

Mots-clés : érosion hydrique, RUSLE, transport solide, apport liquide, apport solide, bassin versant d'Oued Lakhdar, Algérie.

Dédicace

Je consacre ce petit travail :

*Dans le souvenir de mon père Ali, de ma sœur Ismahane
et du mon nouveau Walid, que Dieu les accueille dans son
immense paradis,*

À ma bien-aimée mère,

À Houria, ma femme, et à Raghad Sirine, ma petite fille,

Auprès de ma famille, À mes collègues et mes proches,

Amine

Remerciements

Je souhaite manifester ma gratitude envers le Tout-Puissant qui m'a accordé la force et la vitalité nécessaires pour mener à bien cette mission. » Je n'oublie pas non plus tous ceux qui, de manière directe ou indirecte, m'ont soutenu dans sa mise en œuvre.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon Directeur de thèse, Monsieur **GHENIM Abderrahmane Nekkache**, Professeur à l'Université de Tlemcen. Il a non seulement proposé et supervisé cette recherche, mais a également été d'une grande aide tout au long de son développement grâce à sa disponibilité et ses conseils avisés. Je souhaite manifester ma profonde reconnaissance à Monsieur **DJELLOULI Fayçal**, titulaire du poste de Maître de conférences classe A au centre universitaire d'El Bayadh. Sa précieuse expertise et son appui ont été déterminants dans l'accomplissement de ma thèse.*

*Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à Madame **ABDELBAKI Chérifa**, Professeure à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'elle me fait en présidant ce jury. Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **MEGNOUNIF Abdesselam**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir consenti à examiner et évaluer ce projet de thèse doctorale.*

*Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à Monsieur **KAZI-TANI Hychem**, Maître de conférences classe A au centre universitaire de Maghnia, une personne très respectée, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **GUEMOU Bouabdellah**, Maître de conférences classe A à l'Université d'Ain Témouchent, une personnalité hautement estimée, pour avoir consenti à évaluer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **BOUDALIA Chihab**, Chef de Service Hydrologie à l'ANRH d'Oran, pour le temps précieux qu'il m'a constamment consacré en me guidant tout au long de la réalisation de ce travail de recherche. Avec leurs compétences et leurs recommandations, j'ai réussi à perfectionner mon travail. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Monsieur **MEGHRAOUI Maamar**, chercheur à l'Institut National de Recherche en Foresterie de Tlemcen, et le Directeur monsieur **MORSLI Boutkhil**, pour leurs recommandations et observations précieuses qui m'ont été extrêmement bénéfiques.*

Sommaire

ملخص.....	I
Abstract.....	II
Résumé	III
Dédicace.....	IV
Remerciements.....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XV
Liste des abréviations.....	XVII
Introduction générale	1

Chapitre I. L'hydrologie et transport solide dans les pays de Maghreb central

Introduction	5
I- 1. Problématique.....	5
I- 2. Evolution du climat aux pays de Maghreb central.....	8
I- 3. La sécheresse aux pays de Maghreb central.....	15
I- 3.1 Tunisie	16
I- 3.2 Algérie.....	17
I- 3.3 Maroc.....	19
I- 4. Impact de la sécheresse sur le cycle de l'eau aux pays de Maghreb central.....	21
I- 5. L'hydrologie aux pays de Maghreb central.....	24
I- 6. Le transport solide aux pays de Maghreb central	26
I- 7. L'effet de la sécheresse sur l'hydrologie et le transport solide au Maghreb central	27
I- 8. Dégradation des sols et érosivité aux pays de Maghreb central.....	28
I- 9. Apports sédimentaires des oueds aux pays de Maghreb central	31
I- 10. La typologie des oueds du Maghreb central	32
I- 11. L'envasement spécifique des barrages du Maghreb central.....	34
I- 12. Le cas d'Algérie	37
Conclusion	44

Chapitre II. Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Lakhdar

Introduction	45
II- 1. Le bassin versant de la Tafna	45
II- 2. Le bassin versant de l'Isser.....	48
II- 3. Présentation de la zone d'étude : Bassin versant d'Oued Lakhdar	50
II- 3.1. Les Caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Lakhdar	51
II- 3.2. Aperçu géologique.....	61

II-	3.2.1. Description litho stratigraphique	61
II-	3.2.2. Géomorphologie	63
II-	3.2.3. Pédologie	64
II-	3.3. Aperçu hydrogéologie.....	66
II-	3.3.2. Réciprocité entre fracturation et karstification	67
II-	3.3.3. Les eaux souterraines	67
II-	3.3.4. Les ressources en eau superficielles	68
	Conclusion	69

Chapitre III. Climat de la zone d'étude et l'effet de la sécheresse

	Introduction	70
III-	1. Etude de climat : cas de bassin versant d'Oued Lakhdar (Ex-Chouly).....	70
III-	1.1. Analyses statistiques.....	78
III-	1.1.1. Tests statistiques et valeurs de p.....	78
III-	2.1. Aperçu des données pluviométriques	78
III-	2.1.1. Analyse statistique	78
III-	2.1.2. Vérification de l'homogénéité de la série - Test de Wilcoxon	79
III-	2.1.3. Calcul du paramètre de la loi choisie	80
III-	2.1.3.1. Adapté de la série pluviométrique à la loi normale	81
III-	2.1.3.2. Analyse des données de température et choix du type de loi d'ajustement.....	83
III-	3. L'agressivité climatique	84
III-	3.1. L'effet de la sécheresse sur l'hydrologie et le transport solide	85
III-	3.2. Le phénomène de sécheresse	90
III-	3.2.1. Types de sécheresse	90
III-	3.2.1.1. Sécheresse météorologiques.....	90
III-	3.2.1.2. Sécheresse agricole.....	91
III-	3.2.1.3. Sécheresse hydraulique.....	91
III-	3.2.1.4. Sécheresse socio-économique	91
III-	3.3. Causes de la sécheresse	92
III-	3.4. Conséquences de la sécheresse	93
III-	3.5. Les indices de sécheresse.....	94
III-	4. Impact du changement climatique sur la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar.....	96
III-	4.1. Indice de précipitation standard (SPI)	97
III-	4.2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	97
III-	4.3. Indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI)	98
III-	4.4. Analyse de corrélation entre (SPI ; SPEI) et (SPI ; PDSI)	101
III-	4.5. Analyse des propriétés de la sécheresse	102
III-	4.6. Analyse de fréquence	103

Conclusion	107
------------------	-----

Chapitre IV. Les phénomènes extrêmes dans le contexte des changements climatiques : Cas de bassin versant d'Oued Lakhdar

Introduction	108
IV- 1. Les recherches scientifiques sur les phénomènes extrêmes	108
IV- 1.1. La zone d'étude: Cas de bassin versant d'Oued Lakhdar	110
IV- 2. Acquisition de données	111
IV- 3. Méthodes adoptées	112
IV- 3.1. Classification des températures ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$)	113
IV- 4. Analyse des données pluviométriques et choix du type de loi d'ajustement	113
IV- 4.1. Analyse des données statistiques	113
IV- 4.2. Vérification de l'homogénéité de la série - Test de Wilcoxon	114
IV- 4.3. Calcul du paramètre de la loi choisie	115
IV- 4.3.1. Ajustement de la série pluviométrique à la loi normale	115
IV- 4.4. Tests de détection des ruptures dans la série des précipitations	117
IV- 4.4.1. Test de Buishand et ellipse de Bois	118
IV- 4.4.2. Méthode non paramétrique de Pettitt	118
IV- 4.4.3. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian	119
IV- 4.4.4. Segmentation de Hubert	120
IV- 4.5. Analyse des données de température et choix du type de loi d'ajustement	120
IV- 4.5.1. Tests de détection des ruptures dans la série des données des températures	121
IV- 4.5.1.1. Méthode non paramétrique de Pettitt	121
IV- 4.5.1.2. Segmentation de Hubert	121
IV- 4.6. Analyse de corrélation entre SPI et SPEI	123
IV- 4.7. Évaluation des sécheresses extrêmes	124
IV- 4.8. Analyse de fréquence	126
IV- 5. Les tests pour les valeurs extrêmes de température annuelle	128
IV- 5.1. Test de Dixon pour les valeurs extrêmes de température annuelle	128
IV- 5.2. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes de température annuelle	128
IV- 6. Tests pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles	129
IV- 6.1. Test de Dixon pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles	129
IV- 6.2. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles	129
Conclusion	131

Chapitre V. Hydrologie et transport solide : Cas de bassin versant de l'Oued Lakhdar

Introduction	132
V - 1. Variabilité des précipitations	132
V- 2. Variabilité de température.....	134
V - 3. Variabilité de débit	136
V- 3.1. Apports liquides	136
V- 4. Evaluation quantitative de l'érosion hydrique par les techniques spatiales.....	137
V- 4.1. Méthode RUSLE	138
V- 4.1.1. Détermination des paramètres d'érosion.....	139
V- 4.1.1.1. Facteur d'érosivité des pluies (R)	139
V- 4.1.1.2. Facteur d'érodibilité du sol (K).....	141
V- 4.1.1.3. Facteur topographique (LS).....	144
V- 4.1.1.4. Facteur d'exploitation du couvert (C).....	146
V- 4.1.1.5. Facteur de pratique antiérosive (P)	151
V- 4.2. Quantification de l'érosion par (RUSLE).....	152
V- 4.2.1. Analyse des pertes des terres	152
V- 5. Etude de transport solide dans le bassin versant d'Oued Lakhdar	157
V- 5.1. Matériels et méthodes de calculs	157
V- 5.2. Répartition spatiale	159
V- 5.2.1. Etude des tendances	159
V- 5.2.1.1. A l'échelle instantanée	159
V- 5.2.1.2. A l'échelle saisonnière	160
V- 5.3. Bilan des apports solides	161
V- 5.3.1. Etude des tendances	161
V- 5.3.1.1. A l'échelle annuelle	161
IV- 5.3.1.2. A l'échelle saisonnière	163
V- 5.3.1.3. A l'échelle mensuelle	164
V- 5.4. La relation entre l'apport liquide et solide cumulé	165
V- 5.4.1. Etude des tendances	165
V- 5.4.1.1. A l'échelle annuelle	165
V- 5.4.1.2. A l'échelle saisonnière	166
Conclusion	168

Chapitre VI. Etude des crues : Cas de bassin versant de l'Oued Lakhdar

Introduction	170
VI- 1. Évaluation des crues (1970-2021).....	170
VI- 2. Les crues significatifs (1970-2021)	178
VI- 3. Concentration et agressivité	181
VI- 3.1. Exposé du problème d'hystérésis dans les relations (C/QL)	181
Conclusion	189
Conclusion générale.....	191
Références bibliographiques.....	194

Liste des figures

Figure I-1 Précipitations moyennes annuelles au Maghreb central (1960-2010).....	10
Figure I-2 Changement des températures annuelles au Maghreb central à l'horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles).	11
Figure I-3 Etages bioclimatiques de l'Algérie de Nord	14
Figure I-4 Pourcentage des phénomènes météorologiques intenses au Maroc en 2022, (Crop Growth Monitoring System – Maroc	14
Figure I-5 Indice de précipitation normalisé (SPI) sur deux années terminant en janvier 2023	15
Figure I-6 Indice centré réduit calculé pour les pluies annuelles - (événements secs en rouge) - Medjerda -Tunisie	16
Figure I-7 Indice centré réduit en Tunisie calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011)	17
Figure I-8 Indice centré réduit en Algérie calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011)	19
Figure I-9 Évolution annuelle de l'indicateur (SPI) à El Houceima et Tetouan (Maroc)	20
Figure I-10 Indice centré réduit au Maroc calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011)	21
Figure I-11 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, en Tunisie	23
Figure I-12 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, en Algérie	23
Figure I-13 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, au Maroc	24
Figure I-14 Altitudes aux pays du Maghreb central	25
Figure I-15 Précipitations des Oueds Maghrébins central d'Ouest en Est, du Maroc jusqu'en Tunisie.	26
Figure I- 16 Importance de la sédimentation locale au sein du bassin versant : particularité du Maghreb central	27
Figure I-17 Typologie des oueds selon leurs transport solide spécifique, la taille de leurs BV et leur pente moyenne, Type 1 : Agrioun, Rhis, Laou, Martil et Nekor, Type 2 : Isser, Kert, Soummam, Bou Alalah, El Kebir, Seybouse et Sebaou, Type 3 : Cheliff, Medjerda, Moulouya	33
Figure I-18 Nombre de barrages au Maghreb central	35
Figure I-19 Capacité totale de stockage au Maghreb central	35
Figure I-20 Envasement annuel au Maghreb central	35
Figure I-21 Problèmes posés par la sédimentation	36
Figure I-22 Evolution à long terme des températures de 1991 à 2022	37
Figure I-23 Carte pluviométrique annuelle (mm) de l'Algérie de Nord (1990-2023)	38
Figure I-24 Taux d'érosion hydrique en Algérie	39
Figure I-25 Évolution du nombre de barrages Algériens et de la capacité de stockage pour période 1830-2019	41
Figure I-26 Évolution de la capacité de stockage initiale et actuelle des barrages Algériens pour période 1930 - 2019	41
Figure I-27 Sensibilité à l'envasement des barrages en Algérie	42
Figure II -1 Le bassin versant de la Tafna.....	46

Figure II-2 Précipitations moyennes interannuelles (1969-2022) de bassin versant de la Tafna	48
Figure II-3 Carte de situation du bassin versant de l'Isser.	49
Figure II-4 Occupation de sol du bassin versant de l'Isser.	50
Figure II-5 Localisation du bassin versant d'Oued Lakhdar.....	51
Figure II-6 Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Lakhdar.	52
Figure II-7 Relief du bassin versant d'Oued Lakhdar.....	54
Figure II-8 Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lakhdar.....	54
Figure II-9 Direction des pentes du bassin versant d'Oued Lakhdar.	58
Figure II-10 Profil en long du cours d'eau principal de l'Oued Lakhdar.	60
Figure II-11 Vue d'ensemble des formations principales présentes dans les monts de Tlemcen	61
Figure II-12 Carte géologique du groupement urbaine Tlemcen-Mansourah-Chetouane	63
Figure II-13 Carte géomorphologiques de la wilaya de Tlemcen	64
Figure II-14 Carte pédologique ; (a) Monts de Tlemcen ; (b) Régions méditerranéennes	65
Figure II-15 Analyse hydrogéologique de l'Oued Lakhdar	66
Figure II-16 Système Aquifère De La Tafna.....	67
Figure II-17 Situation Géographique Des Barrages De La Tafna	68
Figure III-1 Situation géographique des stations hydro-pluviométriques dans la région de la Tafna. ..	72
Figure III-2 Evolution moyenne annuelle des températures et des précipitations (1999- 2021) ; (a) Température (Moyenne, Maximum, Minimum) et nombre de jours de chaleur et de forte chaleur à la station de Hammam Boughrara ; (b) Précipitations et distribution du nombre de jours de pluie pour les cinq stations (Henaya, Chouly, Meurbah, Lala Seti et Tlemcen)	77
Figure III-3 Diagramme de dominance pour différentes stations	80
Figure III- 4 Estimation des quantiles pour différentes stations (1999-2021).....	83
Figure III-5 5 Agressivité climatique dans les stations de Heriz et Chouly, (1973-2001).....	84
Figure III-6 Carte des déficits pluviométriques au Nord d'Algérie	88
Figure III-7 Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts.....	92
Figure III-8 Carte de la sensibilité à la sécheresse	94
Figure III-9 (a) Relation entre SPEI-12 mois et SPI-12 mois ; (b) Relation entre PDSI-12 mois et SPI-12 mois (1999 à 2021).....	102
Figure III-10 Variations de : (a) SPI-12 mois ; (b) SPEI-12 mois et (c) PDSI-12 mois de 1999 à 2021	103
Figure III-11 Fréquence et classification des classes pour : (a) SPI-12 mois, (b) SPEI-12 mois et (c) PDSI-12 mois de 1999 à 2021.	104
Figure III-12 Fréquences des catégories d'événements de sécheresse extrêmes, sévères et modérées pour (SPI-12 mois), (SPEI-12 mois) et (PDSI-12 mois) de 1999 à 2021.....	105
Figure IV-1 Localisation géographique du bassin versant d'Oued Lakhdar	111
Figure IV-2 Les méthodes utilisées.	112
Figure IV-3 Diagramme de dominance pour la station de Chouly.	115
Figure IV-4 Statistiques estimées à partir des données et calculées à partir des estimateurs des paramètres de la loi normale.	116
Figure IV-5 (a) Graphiques P-P (loi normale) ; (b) Graphiques Q-Q (distribution normale).....	117
Figure IV-6 Comparaison de deux distributions (Kolmogorov-Smirnov).....	117

Figure IV-7 Analyse de Buishand et ellipse de Bois pour les données de précipitations (1970-2021).	118
Figure IV-8 Méthode non paramétrique de Pettitt pour les précipitations (1970-2021).	118
Figure IV-9 Mise en œuvre de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Graphique de probabilités) pour les précipitations (1970-2021).	119
Figure IV-10 Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Graphique amplitudes) pour les précipitations (1970-2021).	119
Figure IV-11 Statistiques estimées à partir des données et calculées à partir des estimateurs de paramètres de la loi normale.	120
Figure IV-12 Approche de Pettitt pour les températures (1970-2021).	121
Figure IV-13 Nombre de jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) et nombre de jours avec pluie (1970 à 2021).	122
Figure IV-14 Relation entre le SPEI et le SPI (1970 à 2021) : (a) sur une échelle de 1 mois ; (b) sur une échelle de 3 mois ; (c) sur une échelle de 6 mois ; (d) sur une échelle de 9 mois ; (e) sur une échelle de 12 mois ; (f) sur une échelle de 24 mois.	124
Figure IV-15 Variations du SPI et du SPEI (1970 à 2021) : (a) sur une échelle de 1 mois ; (b) sur une échelle de 3 mois ; (c) sur une échelle de 6 mois ; (d) sur une échelle de 9 mois ; (e) sur une échelle de 12 mois ; (f) sur une échelle de 24 mois.	125
Figure IV-16 Fréquences des catégories d'événements de sécheresse extrêmes, sévères et modérés pour (SPI) et (SPEI) sur différentes échelles de temps (1970 à 2021).	127
Figure IV-17 Test de Dixon et test de Grubbs pour les valeurs extrêmes de température annuelle (1970-2021).	129
Figure IV-18 Test de Dixon et test de Grubbs pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles (1970-2021).	130
Figure V-1 Situation des stations de jaugeage dans la région de la Tafna.	133
Figure V-2 (a) Variation interannuelle des précipitations (1970-2021) ; (b) Variation saisonnière des précipitations (1970-2021) ; (c) Variation mensuelle moyenne des ondes d'eau précipitées (1970-2021) ; (d) Variation journalière moyenne des précipitations dans le bassin versant de Wadi Lakhdar au cours de la période (1970-2021).	134
Figure V-3 (a) Variation annuelle moyenne de la température (1970-2021) ; (b) Variation saisonnière moyenne de la température (1970-2021) ; (c) Variation mensuelle moyenne de la température (1970-2021) ; (d) Variation journalière moyenne des températures (1970-2021).	135
Figure V-4 (a) Débits interannuelles dans la région d'étude ; (b) Variation saisonnière moyenne des débits ; (c) Variation mensuelle moyenne des débits ; (d) Variation journalière moyenne des débits (1970-2021).	137
Figure V-5 Diagramme de l'approche utilisée	139
Figure V-6 Carte d'érosivité des pluies en ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) du bassin versant d'Oued Lakhdar.	141
Figure V-7 Carte d'érodibilité (K) en ($\text{ton}\cdot\text{acre}\cdot\text{hr}/\text{hundreds of acre}\cdot\text{ft}\cdot\text{tons}\cdot\text{in}$) du bassin versant d'Oued Lakhdar.	143
Figure V-8 Pente du bassin versant d'Oued Lakhdar.	145
Figure V-9 Les variations de LS dans la région de l'Oued Lakhdar.	146
Figure V-10 Indice de végétation (NDVI) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.	148
Figure V-11 Carte d'occupation de sol dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.	149
Figure V-12 Différentes valeurs de C dans le bassin versants d'Oued Lakhdar.	150
Figure V-13 Différentes valeurs de facteur P dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.	152

Figure V-14 Carte de dégradation des terres dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.....	153
Figure V-15 Étude de la corrélation entre les débits solides et les débits liquides instantanés dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).....	159
Figure V-16 Relation entre les débits liquides et solides instantanés (1970-2021) dans le bassin versant de l'oued Lakhdar, (a) automne, (b) hiver, (c) printemps, (d) été.....	161
Figure V-17 L'évolution des apports solides de l'Oued Lakhdar entre 1970 et 2021.....	162
Figure V-18 Variation saisonnière des apports solides de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	164
Figure V-19 Variation mensuelle des apports solides de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	165
Figure V-20 Les apports cumulés annuelles dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021) ..	166
Figure V-21 Les apports cumulés saisonnières dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021), (a) Automne, (b) Hiver, (c) Printemps, (d) Eté.....	167
Figure VI-1. (a) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	171
Figure VI-1. (b) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	172
Figure VI-1. (c) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	173
Figure VI-1. (d) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	174
Figure VI-1. (e) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	175
Figure VI-1. (f) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	176
Figure VI-1. (g) Inondations pendant la période d'étude (1970-2021).....	177
Figure VI- 2 Crue d'automne : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau s'écoulant du bassin versant de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	178
Figure VI-3 Crue hivernale : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau s'écoulant du bassin versant de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	179
Figure VI- 4 Crue printanière : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau s'écoulant du bassin versant de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	180
Figure VI- 5 Crue estivale : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau s'écoulant du bassin versant de l'Oued Lakhdar (1970-2021).....	180
Figure VI-6-a-b-c-d Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q _L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (a-b-c-d) les crues d'automne..	183
Figure VI-6-e-f-g-h Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q _L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (e-f-g-h) les crues d'automne. .	184
Figure VI-6-i-j-k-l Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q _L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (i-j) les crues d'automne, (k-l) les crues d'hiver.	185
Figure VI-6-m-n-o-p Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q _L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (m-n-o) les crues d'hiver, (p) les crues de printemps.	186
Figure VI-6-q-r-s-t Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q _L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (q-r-s-t) les crues de printemps.....	187

Liste des tableaux

Tableau I-1 Les ressources renouvelables aux Maghreb central	9
Tableau I-2 Les épisodes extrêmes en Tunisie (2000-2018)	12
Tableau I-3 Les trois ensembles géo climatiques de l'Algérie climatique	13
Tableau I-4 Les étages bioclimatiques en Algérie	13
Tableau I- 5 Séquences sèches, normales et humides	18
Tableau I-6 Pourcentage des années climatiques observées entre 1970 et 2018 à El Houceima et Tetouan (Maroc) selon l'indicateur (SPI).....	20
Tableau I-7 Importance de divers processus d'érosion (t/ha/an) en fonction de trois paysages typiques de l'Afrique	28
Tableau I-8 la classification des oueds en fonction des pentes moyennes	33
Tableau I-9 Taux d'envasement des barrages de Maghreb central 2002	36
Tableau I-10 Etat d'envasement de quelque barrage algérien	43
Tableau II-1 les altitudes de bassin versant d'Oued Lakhdar.	55
Tableau II-2 Classification d'OROSTOM des reliefs sur la base de l'indice des pentes global des bassins versants.....	56
Tableau II-3 Classification des reliefs sur la base de dénivelé spécifique des bassins versants.	57
Tableau II-4 Les caractéristiques hydro-morphométriques de bassin versant de l'oued Lakhdar.....	60
Tableau III- 1 Coordonnées des six stations autour du bassin versant d'Oued Lakhdar	72
Tableau III-2 Nombre de jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$)	73
Tableau III- 3 Données de température annuelle maximale et minimale observées à la station de Hammam Boughrara (1999-2021)	74
Tableau III-4 Caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles de cinq stations (1999-2021)	79
Tableau III- 5 (a) Test du signe et (b) Test de Wilcoxon	79
Tableau III-6 Résumé du test de Wilcoxon pour différentes stations.....	80
Tableau III-7 Ajustement des précipitations par une loi normale et application du test de Kolmogorov-Smirnov.....	81
Tableau III-8 Valeur P (bilatérale) des différentes stations	82
Tableau III-9 Test t et z de différentes stations	82
Tableau III-10 Test de Kolmogorov-Smirnov de la station Hammam Boughrara	83
Tableau III-11 Classification de la gravité de la sécheresse pour (SPI), (SPEI) et (PDSI),	100
Tableau III-12 Catégories (SPI), (SPEI) et (PDSI) (égalisés).	103
Tableau IV- 1 Coordonnées des stations du bassin versant de l'Oued Lakhdar.....	112
Tableau IV-2 Caractéristiques statistiques de la station de données annuelles sur les précipitations (1970-2021).	113
Tableau IV-3 (a) Test du signe et (b) Test de Wilcoxon.....	114
Tableau IV-4 Le test de Wilcoxon pour la station de Chouly.	114
Tableau IV-5 Ajustement des précipitations par une loi normale et application du test de Kolmogorov-Smirnov.....	116
Tableau IV-6 p-value (bilatérale) des différentes stations.	116
Tableau IV- 7 les résultats de segmentation de Hubert pour les précipitations (1970-2021).....	120

Tableau IV-8 Test de Kolmogorov-Smirnov de la station Mefrouche.....	120
Tableau IV- 9 les résultats de segmentation de Hubert pour les températures (1970-2021).	122
Tableau IV-10 Nombre de jours de température ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$), nombre de jours de température élevée ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) et nombre de jours de pluie.....	122
Tableau IV-11 Catégories SPI et SPEI (égalisées) à différentes échelles.	126
Tableau V-1 Les Coordonnées de la station hydro-pluviométrique d'Oued Lakhdar.	133
Tableau V-2 Les Coordonnées de la station météorologique de Mefrouche.	134
Tableau V-3 Les Coordonnées de station hydrométrique utilisée.	136
Tableau V-4 Indice R d'érosivité des précipitations pour les stations Chouly, Meurbah, Lala Setti, Tlemcen, Mefrouche, Sidi Gourari, Sebdou et Beni Bahdel (1970-2021).	140
Tableau V-5 Formation des sols du bassin versant d'Oued Lakhdar.	142
Tableau V-6 Les caractéristiques des sols dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.	142
Tableau V-7 Les valeurs de facteurs d'érodibilité (K) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.	143
Tableau V-8 Classes de pentes pour le bassin versant d'Oued Lakhdar.	145
Tableau V-9 la valeur de (C) pour différentes cultures et pratiques.....	147
Tableau V-10 Différents types d'occupation de sol du bassin versant d'Oued Lakhdar.	150
Tableau V-11 Différents pratiques culturelles du bassin versant d'Oued Lakhdar.	151
Tableau V-12 Perte de sol moyenne annuelle du bassin versant d'Oued Lakhdar,	154
Tableau V-13 Les paramètres (a) et (b) dans les bassins nord-ouest algérien, (a :Paramètre ;b : Paramètre).....	160
Tableau V-14 Résultats de l'analyse statistique de la relation $QS = f(QL)$ dans le bassin versant d'Oued Lakhdar, (R : Coefficient de corrélation ; QS : Débit solide(kg/s) ; QL : Débit liquide (m^3/s)),	160
Tableau V-15 Les dégradations spécifiques moyennes pour quelques bassins versants du nord-ouest Algérien.....	162
Tableau V-16 les valeurs extrêmes des (ASS) enregistré dans quelques bassins versants du Nord-ouest Algérien, (ASS : Apport solide spécifique).....	163
Tableau V-17 Variation saisonnières des apports liquides, solides et dégradations spécifiques dans le bassin versant d'oued Lakhdar (AL : Apport liquide ; AS : Apport solide ; ASS : Apport solide spécifique),	164
Tableau VI- 1 Coordonnées des stations du bassin versant de l'Oued Lakhdar.	171
Tableau VI-2 Classes des relations (C/ Q_L) d'après . (C : Concentration des sédiments (g/l) ; Q_L : Débit liquide (m^3/s) ; m : montée ; d : décrue).	181
Tableau VI-3 Bilan des concentrations, débits liquides et solides pendant les crues enregistrées à la station de Chouly située dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021). (C_{max} : Concentration maximale des sédiments (g/l) ; $Q_{L \text{ max}}$: Débit liquide maximale (m^3/s) ; $Q_{S \text{ max}}$: Débit solide maximale (kg/s)).....	182
Tableau VI-4 Typologie des crues basées sur le rapport C/ Q_L	188

Liste des abréviations

- ANAT** : Agence Nationale de l'Aménagement du territoire (Algérie)
- ANBT** : Agence nationale des Barrages et transfert (Algérie)
- ANRH** : Agence Nationale des ressources hydriques (Algérie)
- ASAL** : Agence Spatiale Algérienne
- DGF** : Direction Générale des Forêts (Algérie)
- MJ. mm / ha. H. an** : Mégajoule. Millimètre/ hectare.heure.an
- mm / ha. H. an** : Millimètre/hectare.heure.an
- MNT** : Modèle numérique de terrain
- NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation)
- ONM** : Office national de la météorologie (Algérie).
- ONS** : Office National des statistiques (Algérie).
- OSS** : *Observatoire du Sahara et du Sahel*
- PDSI** : Palmer Drought Severity Index (Indice de gravité de la sécheresse de Palmer)
- RUSLE** : Revised Universal Soil Loss Equation (Equation universelle de perte de terre révisée)
- SIG** : Système d'information géographique
- SPEI** : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Indice normalisé des précipitations et de l'évapotranspiration)
- SPI** : Standardized Precipitation Index (Indice de précipitation standard)
- t/ha/an** : Tonne / hectare / an
- USLE** : Universal Soil Loss Equation (Equation universelle de perte de terre)
- UTM** : Universal Transverse Mercator
- WBG** : World Bank Group (Groupe de la Banque mondiale)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Problématique générale

À l'échelle mondiale, les chercheurs se sont longtemps penchés sur les effets que l'érosion des sols pouvait avoir. Ce phénomène naturel provoque des dommages non seulement à l'agriculture, mais également à l'écosystème. La région méditerranéenne est connue pour ses risques érosifs extrêmement élevés (Hudson, 1992). Selon Heush et al. (1970) ; Demmak (1982); Arabi et al. (1991); Meddi (1992); Roose (1993); Morsli (1996); Laouina (1998); Touaibia et al. (2000); Mazour et Roose, 2002 ; Gesri, 2019 ; Kazi Tani, 2019 ; Meghraoui, 2019 ; Benselama, 2019 ; Bouhadab, 2019 ; Boussalim et al., 2022 ; El Mazi et al., 2022 ; Hallouz et Meddi, 2022 ; Aouachria, 2023 ; Aissaoui et Ben ghazi, 2023 ; Ben Cheikha et al., 2023 ; Kazi Tani et al., 2023 ; Bouleknafet et Elahcene, 2023 ; Hallouz et al., 2023 ; Marghmi et al., 2024 ; Gdiri et al., 2024 ; Fredj et al., 2024 ; Gherissi et al., 2024 ; Ouallali et al., 2024), les ressources en eau et en sol sont gravement en danger au Maghreb.

La dégradation des sols s'accroît en raison de divers facteurs naturels et humains qui favorisent le début et l'évolution des processus d'érosion. On peut classer ces facteurs en deux catégories : ceux qui sont quasi-statiques relatives (infiltration, érodibilité et morphologie) et ceux qui ont une variabilité temporelle (intensité des pluies, occupation du sol, couvert végétal et pratiques agricoles) (Boukheir et al., 2006), entre autres. Ces facteurs ont entraîné une augmentation de la quantité de matériaux perdus par les sols, qui se retrouvent dans les cours d'eau, les retenues de barrages, les lacs et les zones de sédimentation (Sadiki, 2005).

L'agressivité des précipitations et la nature des sols sont responsables des pertes en sol et du ruissellement (Chebbani, 1996). Cette agressivité, qui est plus liée aux intensités qu'aux hauteurs de précipitations, se manifeste par l'émergence d'une énergie cinétique qui altère la structure du sol, ce qui entraîne une porosité des horizons pédologiques superficiels (Collinet et Valentin, 1979).

L'érosion des sols a donné naissance au transport des matières solides en suspension, qui a entraîné de grands efforts de la part des nations pour lutter contre la dégradation des terres arables, l'envasement des barrages et l'impact dévastateur des cycles d'inondation et de désertification qu'il peut engendrer (De ploey et al., 1991; Shaban et Khawlie, 1998).

Afin de mieux combattre l'érosion et le transport solide, il est essentiel de repérer ses origines et ses répercussions. L'objectif est de créer une carte des pertes de sol et de repérer les zones à risque qui nécessitent d'abord des travaux d'aménagement contre l'érosion hydrique.

Malgré l'importance des caractéristiques de la lithologie (Demark, 1982), les mesures des transports solides sur les bassins versants permettent d'évaluer la dégradation globale et de mettre en évidence les zones ou sous-bassins nécessitant une intervention protectrice.

Selon [Boardman et Poesen \(2006\)](#), la cartographie de l'érosion est un outil essentiel pour évaluer la répartition et l'étendue géographique du phénomène, ainsi que pour le caractériser de manière qualitative. La cartographie de l'érosion permet d'intégrer ce phénomène comme élément du processus d'aménagement du territoire, et plus spécifiquement dans le processus de gestion intégrée ([Desmet et Govers, 1996](#)). Selon [Okoth \(2003\)](#), l'intégration des deux méthodologies, à savoir la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée, dans les systèmes d'informations géographiques (SIG), facilite l'utilisation de ces deux éléments comme un outil sophistiqué pour guider les décisions visant à aménager le territoire.

Cas de l'Algérie

Au cours du 20^{ème} siècle, les environnements montagneux en Algérie ont connu des dégradations significatives, principalement en raison du développement des populations et de la pression qu'elles ont exercée sur les ressources naturelles. Une des caractéristiques de cette détérioration est l'érosion hydrique des sols qui s'est accélérée de manière préoccupante au cours des dernières décennies.

Selon [Touaibia, 2010](#) ; [Boutkhil et al, 2013](#), l'Algérie parmi les pays les plus touchés par l'érosion dans le monde. Environ 6 millions d'hectares sont vulnérables à la dégradation des sols et les eaux emportent 120 millions de tonnes de matières solides chaque année ([Heddadj, 1997](#)). Selon [Remini et Remini \(2003\)](#), les trois pays du Maghreb, qui possèdent 230 barrages d'une capacité totale de 23 milliards de m³, dont 61 % sont destinés au Maroc, 23 % à l'Algérie et 16 % à la Tunisie, observent une perte annuelle de 125 milliards de m³. En Algérie, plus de 20% des barrages sont submergés ([Achite et Meddi, 2005](#)).

Le développement de l'agriculture et la gestion des ouvrages hydrotechniques sont fortement limités par l'érosion et le transport solide, en raison de l'instabilité des précipitations dans les zones semi-arides méditerranéennes, de la topographie des zones montagneuses, de la fragilité des sols, de l'absence de couvert végétal et des systèmes de culture inadaptés.

En Algérie, avec une rareté et une irrégularité des ressources en eau, le phénomène de dégradation des sols est alarmant ([Toumi et al. 2013](#) ; [Boutkhil et al. 2013](#) ; [Souidi et al, 2014](#) ; [Achite et Ouillon 2016](#) ; [Sabah et al. 2018](#) ; [Boughalem et al. 2020](#) ; [Arabi, 2021](#) ; [Diaf et Ghenim, 2021](#) ; [Aouachria, 2023](#) ; [Kazi Tani et al, 2023](#) ; [Bouleknafet et Elahcene, 2023](#) ; [Hallouz et al, 2023](#) ; [Gherissi et al, 2024](#) ; [Hallouz et Meddi, 2022, 2024](#)). Les zones vulnérables aux risques de dégradation liés à la désertification et à l'érosion hydrique sont estimées à 5.10⁵ km² en Algérie ([MADR, 2010](#)), ce qui représente plus de 20 % de la superficie totale du pays, qui est d'environ 28,3.10⁵ km². Par conséquent, l'érosion hydrique affecte 1,4.10⁵ km² de zones de montagne au Nord, 3,2.10⁵ km² de zones steppiques sont directement exposées à la désertification et 4,1.10⁴ km² de forêts sont exposées aux conséquences des changements climatiques ([Mostephaoui et al., 2013](#)). Selon [Remini \(2000\)](#), les pertes annuelles en capacité des barrages sont estimées à environ 20 hm³ en raison de l'envasement.

Les études [Greco \(1966\)](#), [Benchetrit \(1972\)](#), [Kouri \(1993\)](#), [Touaibia et al. \(2000\)](#), [Roose et al. \(2012\)](#) et [Toumi et al. \(2013\)](#) ont été réalisées pour étudier le phénomène de dégradation des sols dans le Nord-Ouest algérien. La variation spatiale et temporelle de dégradation des terres dans le centre et l'Ouest

algérien a été démontrée par [Meddi \(2013 et 2015\)](#). Dans cette étude, le climat, la végétation, la topographie, le type de sols et l'influence néfaste des activités sur les sols ont été pris en considération. D'après [Meddi et al \(2014\)](#), la sécheresse a eu un impact spécifique sur les plaines Nord-Ouest et le centre du pays. Cela conduit à une diminution significative des ressources en eau, entraînant des dégâts considérables aux agricultures, on peut évaluer la sécheresse en utilisant l'indice de sécheresse de Palmer et l'indice standardisé de précipitation.

Selon [Mazour \(2004\) et Roose et al. \(2000\)](#), la dégradation des sols par érosion en nappe dans les montagnes méditerranéennes du Tell occidental sont estimées entre 0,1 et 20 t.ha⁻¹.an⁻¹, tandis que l'ablation par ravinement est estimée entre 90 et 300 t.ha⁻¹.an⁻¹. Selon [Heddadj \(1997\)](#), 6 millions d'hectares sont soumis à une dégradation active ; 120 millions de tonnes de matières solides sont transportées chaque année vers la plage. Il est crucial de préserver les barrages situés dans ces régions marneuses de l'Ouest algérien qui sont en voie d'envasement rapide ([Kouri et Gomer, 2010](#)). Il est donc primordial de saisir les éléments essentiels de ce phénomène pour prendre des actions visant à préserver les sols contre la dégradation des terres par l'écoulement des eaux dans l'Algérie ([Ramdani, 1993](#)).

Pour certains bassins algériens, de nombreux chercheurs ont établi des liens entre le transport solide et les facteurs géomorphologiques et climatologiques ([Touaibia et al., 2001](#) ; [Benkhaled et Remini, 2003](#) ; [Achite et Meddi, 2004,2005](#) ; [Achite et Ouillon,2007](#)). Par ailleurs, Des modèles d'estimation d'érosion ont été élaborés par [Demmak \(1982\) et Meddi et al. \(1998\)](#). La partie nord de l'Algérie est composée de montagnes avec des bassins de petite et moyenne taille, avec une forte variation de dégradation des sols en raison d'une végétation peu dense et d'un climat instable et hostile ([Ghenim et Megnounif, 2016](#)). En général, les études locales sont limitées par le manque des données climatiques ([Hasbaia et al. 2017](#) ; [Toubal et al. 2018](#) ; [Bouderbala et al. 2019](#)).

Contexte

Cette recherche s'est concentrée sur la zone l'Oued Lakhdar, qui se trouve dans une zone semi-aride. Son principal cours d'eau, l'oued Chouly, s'étend sur une distance de 30 km et a un écoulement temporaire. L'objectif de cette thèse est d'analyser le transport de matières solides dans la zone d'étude (170 km²), qui alimente le barrage d'El Izdihar à Sidi Abdelli.

Notre travail suscite l'intérêt :

- Dans le contexte des changements climatiques, il est nécessaire d'analyser les phénomènes extrêmes tels que la sécheresse et les inondations dans la zone d'étude en utilisant des indices de sécheresse (SPI, SPEI et PDSI) ainsi que l'observation des effets de la sécheresse sur le transport solide ;
- En utilisant les données climatiques recueillies par l'ANRH et l'ONM pendant 52 ans, il est envisageable d'étudier l'atmosphère et les interactions instantanées entre les débits liquides et les concentrations de particules, dans le but de créer un modèle de transport solide en suspension adapté au bassin ;

- L'équation universelle des pertes en sols révisée (RUSLE) est utilisée. Il est possible de mesurer le taux d'érosion sur une surface spécifique en se basant sur RUSLE ;
- En étudiant le déplacement des particules solides dans la zone d'étude après un événement hydrologique. Les sciences hydrologiques jouent un rôle crucial en modélisant les flux de débit et en mesurant la dégradation des sols dans la zone d'étude.

La structure de la thèse

Cette thèse est structurée en six chapitres : Le premier est dédié à une synthèse de la littérature. Il offre une vue d'ensemble de l'hydrologie et du transport solide dans les pays du Maghreb central.

Dans le chapitre deux, nous examinerons la région d'étude en présentant ses caractéristiques.

Le troisième chapitre aborde des éléments hydrologiques, climatiques et l'impact de la sécheresse sur la zone d'étude. On réalise une étude statistique des divers paramètres météorologiques (Précipitation et Température) ainsi que des indices de sécheresse (SPI, SPEI et PDSI).

Les phénomènes extrêmes dans le contexte des changements climatiques dans la région d'enquête sont étudiés dans le quatrième chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous examinons le transport solide et l'érosion dans le bassin Oued Lakhdar en utilisant les données hydrométriques collectées à la station de jaugeage de Chouly et en utilisant la méthode RUSLE.

Le dernier chapitre aborde l'étude des crues dans le bassin versant et leur influence sur la sédimentation.

Finalement, la conclusion générale servira de synthétiser cette étude et de présenter les résultats, ainsi que de dresser un certain nombre de limites associées à cette étude.

NOTE

- Les données fournies par (ANRH) et (ONM) sont utilisées pour la réalisation de cette thèse. Elles incluent également des cartes d'état-major, des photos satellitaires, une carte numérique des sols du monde (DSMW), une carte état du terrain (land Sat), une sentinelle de la couverture terrestre 2 (land cover sentinel 2, LC) ;
- Les données collectées sur une période longue (1970-2021) permettent d'analyser la réactivité de la région d'étude face aux changements climatiques. Les tests statistiques utilisés dans la recherche seront le test de Wilcoxon, le test de Kolmogorov-Smirnov, le test de Buisson et l'ellipse de Bois, la méthode non paramétrique de Pettitt, la segmentation Hubert, le test Shapiro-Wilk, le test Anderson-Darling, le test Lilliefors, le test Jarque-Bera, le test Dixon, le test Grubbs, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian. Elle fera également appel à un SIG, ainsi qu'à des logiciels tels qu'Arc Gis 10.4, R-Studio, XL-Stat 2016, Chronostat 1.01. La détection de la sécheresse par SPI, SPEI, PDSI et la cartographie d'érosion par la méthode RUSLE.

Chapitre I

Hydrologie et transport solide dans les pays du Maghreb central

Introduction

Depuis plus d'un demi-siècle, la détérioration des ressources s'est fortement accrue à travers le globe en raison de diverses contraintes climatiques et anthropiques (*Bourque,2000*). Aujourd'hui, de nombreux phénomènes, dont le transport solide dans les rivières, sont soumis aux perturbations des ressources en eau auxquelles sont confrontés les hydrologues. Ce transport de solides pose un problème sérieux dans la mesure où les écosystèmes peuvent être endommagés par de grandes quantités de ruissellement des eaux pluviales. De nombreuses études ont été réalisées par divers auteurs afin de concevoir des modèles qui intègrent les paramètres hydro climatiques, (*Belarbi,2018 ; Camenen et Melun,2021*). Le but de ces études est d'expliquer divers phénomènes d'écoulement et de transport de solides et de démontrer les relations entre divers paramètres hydro-climatiques susceptibles d'être appliquées aux régions et aux bassins. Dans ce chapitre, la problématique du transport de sédiments en suspension dans les cours d'eau aux échelles planétaire, régionale et locale dans le contexte du changement climatique est abordée.

I- 1- Problématique

Le phénomène du transport des solides en suspension dans les cours d'eau est très compliqué, il est en relation directe avec la morphologie des bassins versants et l'intensité des précipitations. Le transport de solides chargés dans le fond fait référence au mouvement de sédiments grossiers au fond du lit provoqué par la force des courants d'eau. Ceci est différent du transport en suspension, où les sédiments fins se déplacent dans la colonne d'eau. Ces processus jouent un rôle important pour la vie dans les cours d'eau, car le mouvement de ces sédiments détermine la morphologie des fonds depuis les montagnes jusqu'à la mer, et provoque ainsi indirectement de nombreux problèmes écologiques et socio-économiques (*Misset et al, 2020*). Ces impacts se sont produits aux 19e et 20e siècles lorsque les interventions humaines (stabilisation des pentes, stabilisation des solides des torrents, nettoyage et extraction) ont conduit à une rareté des sédiments et à une incision générale des canaux (*Malavoi et al, 2011*). Ils ne seront renforcés que dans le contexte du changement climatique, qui affecte directement l'hydrologie et le transport des solides (*Turner et al, 2021*). Par conséquent, la mesure du transport solide présente un intérêt croissant pour la gestion des structures et la restauration de la santé des rivières, malgré de nombreuses années de recherche, sa mesure n'est toujours pas aisée et reste aujourd'hui un défi pour la communauté scientifique. Afin d'améliorer les connaissances sur le transport solide et de l'estimer de la meilleure façon possible, de nombreux chercheurs à travers le monde se concentrent sur ce domaine (*Hallouz et Meddi,2024 ;Gdiri et al,2024 ; Fredj et al,2024*).

A l'échelle mondiale de nombreux pays souffrent de problèmes de transport de matières solides (*Boughalem,2013 ; Borrelli et al,2018 ; Bezak,2024 ; Stefanovic et al,2024 ; Sud et al,2024 ; Polovina et al,2024 ; Aleksova et al,2024 ; Casabella-González et al,2024 ;Deka et al,2024*). Dans ce contexte, on citera les travaux de *Rocle et al, (2012)* qui ont estimé les flux solides dans un environnement

insulaire tropical dans le bassin de la Baie Robert en Martinique. Ils ont conclu que les estimations des flux annuels de transport de solides à l'échelle de trois petits bassins (Gaschette, Voltaire et Mansarde) variaient de 8 à 15 t.ha⁻¹.an⁻¹, 2-8 t.ha⁻¹.an⁻¹, 8-20 t.ha⁻¹.an⁻¹. [Johannot \(2022\)](#) a étudié l'influence des incertitudes de mesure sur le terrain et des variations naturelles des données dans le calcul du transport de solides dans deux rivières des Alpes. Les mesures de chargement du lit in situ ont permis de comparer les données mesurées avec des simulations du transport de solides et de la taille des particules de chargement du lit à l'aide de formules d'extension. De plus, ces données ont permis d'estimer les incertitudes et de transférer les variations naturelles de certains paramètres aux résultats de simulation d'écoulement et de volume de solides par la méthode de Monte Carlo. Le volume transporté sur une période donnée est 1,8 à 2,1 fois plus élevé que le volume calculé en appliquant simplement les calculs de transport de solides. En Afrique une étude sur l'érosion dans le bassin de la rivière Yewa (Bénin) a été menée, les résultats montrent que 7,51% (66,32 km²) de la superficie du bassin présente une sensibilité faible à modérée à l'érosion pour 0,34% de sensibilité sévère (3,02 km²). Quant aux dépôts, 8,36% (73,80 km²) de la superficie du bassin révèlent des dépôts faibles à modérés pour 0,68% (6 km²) de dépôts élevés et très élevés avec un bilan positif d'environ 1700,98 t.ha⁻¹.an⁻¹ ([Toundoh et al,2020](#)). En Asie et à titre d'exemple en Pakistan, le barrage Tarbela a perdu 40% de sa capacité en 2018; en Chine, la retenue du barrage Sanmexia a perdu 40% de sa capacité ([Deroo et al,2022](#)). En France, les écoulements sub-torrentiels, caractérisés par une forte concentration en éléments solides, provoquent des dégâts considérables, il s'agit avant tout d'une manifestation exacerbée du ruissellement érosif ([Cerdan et al, 2002](#) ; [Delahaye, 2003](#) ; [Joannon, 2004](#)). Des cumuls (de 50 à 200 mm) ont été mesurés sur des durées inférieures à 15 h et dans 80 % des 269 événements recensés, les pluies dépassent 40 mm en moins de 3 h ([Douvinet et al, 2009](#)).

A l'échelle de Maghreb, des travaux récents ([Bkhairi,2012](#) ; [Bakreti et al,2013](#) ; [Bouguerra et al,2016](#) ; [Ousmana et al,2017](#) ; [Ben rhouma et al,2018](#) ; [Woillez,2019](#) ; [Ben Ghazi et Khmissi , 2019](#) ; [Aserar,2019](#) ; [Khemiri et Jebari, 2021](#) ; [Boussalim et al ,2022](#) ; [Amhani et al,2024,2022](#) ; [arari,2022](#) ; [El Mazi et al,2022](#) ; [Hallouz et Meddi,2022](#) ; [Sghaira,2022](#) ; [Aouachria,2023](#) ; [Aissaoui et Ben ghazi,2023](#) ; [Ben Cheikha et al,2023](#) ; [Kazi Tani et al,2023](#) ; [Bouleknafet et Elahcene ,2023](#) ; [Ouallali et al,2024](#) ; [Hallouz et Meddi,2024](#)) ont conclu que les dégradations spécifiques sont très variables d'un bassin à un autre, les quantités maximales enregistrées dans les pays du Maghreb central sont importantes. En Algérie, la concentration en sédiments en suspension augmente rapidement pour atteindre jusqu'à 547 fois celle enregistrée juste avant le déclenchement de la crue ([Ghenim et al, 2007,2008](#)). Ces charges engendrent des dégradations spécifiques égale à 937 t.km⁻².an⁻¹ dans l'Oued Sebdou en Algérie ([Bouanani,2004](#)). Les résultats des analyses montrent que la dégradation spécifique moyenne dans le bassin versant de l'oued Boumessaoud est de l'ordre de 518 t.km⁻².an⁻¹, ([Bouguerra et al,2016](#)). En Algérie, la perte de capacité est évaluée à 20 millions m³/an en raison de la sédimentation des réservoirs ([Remini, 2000](#)), et le degré d'érosion hydrique varie d'est en ouest (47 % du pays est touchée par l'érosion), suivie par la partie centrale (27 %) et la partie orientale (26 %) ([Abdelkader et al, 2011](#)). Le phénomène d'envasement des barrages a envahi 1,1 Milliards de m³ d'après l'UNESCO, avec un taux moyen annuel de 0,65% de la capacité totale, ce qui représente une durée de vie moyenne de 140 ans ([Kara et Nemdili,2014](#)). En Tunisie, l'envasement des grands barrages (36) est estimé à 675

Millions m³ sur une capacité initiale de 2988 Millions m³, soit un taux d'envasement moyen de 23%, ([DGBGTH,2021](#)). Les 20 grands barrages agricoles subissent des pertes de capacité moyenne de l'ordre de 1% par an ([Deroo et al ,2022](#)).

A l'échelle nationale, l'Algérie est l'un des pays les plus menacés et le rythme de l'érosion est alarmant. En effet, les valeurs mesurées du taux d'érosion sont les plus élevées en Afrique du Nord. Nous notons par exemple la quantité de 7 200 t/km² est constatée chaque année dans la zone d'étude l'Oued Agrioun. Il existe plusieurs études publiées que nous citons à titre d'exemple : Une étude statistique a été réalisée par [Hallouz et al, \(2023\)](#) sur les précipitations et le transport des sédiments dans le Nord-Ouest de l'Algérie. L'analyse statistique montre que les événements s'ajustent de manière raisonnable au type Log-Normal. [Hallouz et al, \(2017\)](#), ont étudié la situation des sédiments en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina, dans l'oued Chellif, au nord-ouest de l'Algérie. L'analyse du débit à la station d'Oued El Abtal montre que le débit oscille entre 40,7 m³.s⁻¹ en 1974 et 0,48 m³.s⁻¹ en 1997, une variation de 95 % ou plus. Le taux d'usure du bassin de l'Oued Mina au cours de la période d'étude a été estimé à 211 t.km⁻².an⁻¹. Cette valeur reste relativement faible par rapport à celles constatées dans d'autres régions aux régimes hydrologiques similaires. Une concentration moyenne de 34 g.l⁻¹ a été enregistrée dans le sous-bassin contrôlé par la station de Sidi Abd kader Djilali et 12 g.l⁻¹ dans le sous-bassin contrôlé par la station de l'Oued El-Abtal. [Kheniche et al, \(2019\)](#) ont estimé du transport de solides en amont pour le bassin versant de l'Oued-Mellegue. La contribution annuelle moyenne des solides au ruissellement des bassins versants est estimée à 570 512,7 t/an et le transport solide spécifique est estimé à 161 t.km⁻².an⁻¹. Cette valeur reste relativement faible par rapport aux valeurs observées dans d'autres bassins versants aux milieux hydrologiques similaires. [Gheraout et al, \(2020\)](#) ont estimé du transport de solides dans le bassin de l'Oued Isser du côté droit du barrage de Koudiat-Acerdoune au nord de l'Algérie. Les résultats de l'étude montrent que la dégradation annuelle spécifique du bassin au cours de la période d'étude entre 1970 et 1985 est de l'ordre de 2142 t.km⁻².an⁻¹. [Madani Cherif et al, \(2017\)](#) ont examinée l'hydrodynamique et la variation de l'écoulement et du rendement sédimentaire dans l'oued El Hammam, situé dans la région semi-aride d'Algérie. Les résultats montrent que le modèle de puissance explique la majorité de la variance (80 %), tandis que l'analyse des apports sédimentaires saisonniers a révélé que la saison d'automne joue un rôle majeur dans le rendement sédimentaire annuel (62 %).

À l'échelle régionale, de nombreuses recherches sur le déplacement des particules ont été réalisées dans les zones situées au Nord-Ouest d'Algérie. Les travaux de [Bouguerra et al \(2016\)](#) ont estimé le transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride dans le bassin versant de l'Oued Boumessaoud situé au nord-ouest de l'Algérie. Les résultats montrent que la dégradation spécifique moyenne est de l'ordre de 518 t.Km⁻².an⁻¹. [Diaf et Ghenim \(2021\)](#) ont estimé le flux solide moyen annuel dans la région étudiée (Ex-Oued Chouly) par 12 707 t correspondant à une dégradation spécifique de 74 t.km⁻².an⁻¹. On notera que ces valeurs se situent approximativement dans les fourchettes des dégradations trouvées dans quelques bassins versants du Nord-Ouest algérien, on cite à titre d'exemples : Mefrouche 39 t.km⁻².an⁻¹ ([Kazi-tani et al, 2017](#)), Oued Saida 55 t.km⁻².an⁻¹ ([Yles et Bouanani, 2017](#)).

Pour cette tâche, et afin de mieux comprendre le problème, l'objectif est d'essayer de trouver une solution pour atténuer le problème du transport solide dans le contexte du changement climatique dans la région étudiée (Oued Lakhdar). On s'intéresse à l'étude des paramètres d'influence et de leur effet ; nous avons également tenté de mettre en lumière certains phénomènes tels que les sécheresses et les inondations et leur rôle dans l'amplification du transport solide dans les pays du Maghreb central. Le choix de ce bassin fluvial de l'Oued Lakhdar ainsi que de la période d'étude est basé sur la disponibilité des données, la nature vierge (pas encore fortement urbanisée) du bassin et le manque des études scientifiques sur cette zone d'étude.

I- 2- Evolution du climat aux pays de Maghreb central

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ([GIEC, 2023](#)) prévient que la fréquence des événements extrêmes ne fait qu'augmenter. Il peut être difficile de s'adapter à cette variation accrue parce que sa durée est imprévisible, son ampleur est incertaine et sa fréquence est inconnue. Le climat et son impact sur la société sont certainement des sujets d'actualité qui intéressent aussi bien les citoyens ordinaires, les scientifiques que les décideurs. Les gens ont remarqué qu'il faisait plus chaud et plus sec. Le rapport de ([GIEC,2023](#)) rappelle que les émissions de gaz à effet de serre dues à l'activité humaine ont réchauffé le climat à un rythme sans précédent : la température à la surface de la Terre a augmenté de 1,1°C par rapport à l'ère préindustrielle. Quel que soit le scénario d'émissions, le GIEC estime que le réchauffement climatique atteindra 1,5°C d'ici le début des années 2030 ([GIEC, 2023](#)).

Le Maghreb central connaît des événements météorologiques inattendus et intenses (inondations, chaleur extrême, sécheresse), en plus d'un stress hydrique accru, autant de signes du changement climatique. Les études récentes montrent que le climat des zones semi-arides, à faible ressources hydriques, aide à stimuler et à accentuer le processus de déplacement des particules à cause des changements climatiques qui se traduisent par une irrégularité des précipitations et par une sécheresse qui s'est établie depuis plusieurs années ([Tassin,2012](#) ;[Bouanani et al,2013](#) ;[Bouguerra et al,2016](#) ;[Boudjemline et al,2016](#) ;[Boulassel et al,2016](#) ; [Belarbi et al,2016](#) ; [Belagoune,2020](#) ;[Youb et al ,2022](#) ;[Oubadi et al,2020 ,2021,2024](#) ;[Rais et al,2024](#) ;[Chemirik et al ,2024](#) ;[Diaf et al,2024](#)).

Dans la classification climatique, les facteurs essentiels pris en compte sont : la température, les précipitations, le nombre de jours de pluie, l'état d'humidité, le brouillard et la rosée. Ces données météorologiques ne sont pas toujours utilisées séparément. Elles sont combinées entre elles pour indiquer les périodes qui ont une influence (favorable ou défavorable) sur la végétation, soit : période chaude, période froide, période sèche, période humide ([Achir,2016](#)).

Préoccupé par le stress hydrique au Maghreb central, la disponibilité en eau a diminué de 60 % au cours des 40 dernières années en Afrique du Nord, L'évolution des précipitations liée au réchauffement climatique, le mauvais entretien des réseaux et le manque d'infrastructures d'épuration sont à l'origine de cette impasse inquiétante, qualifiée par les experts de stress hydrique, dont les premières victimes étaient les petits agriculteurs de la région ([Lebdi et Maki, 2023](#)).

En 2019, la Tunisie, l'Algérie, et le Maroc figuraient sur la liste du *World Resource Institute (WRI)* parmi les 33 pays les plus stressés hydriquement dans le monde. Un rapport en 2018 de la banque mondiale a révélé que près de 40 % de la population algérienne est considérée comme hydriquement stressée, un chiffre qui s'élève à 70 % au Maroc et 80 % en Tunisie (*Wrathall et al,2018*).

Les ressources naturelles en eau du Maghreb central sont parmi les plus faibles au monde et la région fait partie des régions où le taux d'eau par habitant est le plus bas, En effet, le potentiel régional des ressources en eau naturelles renouvelables au Maghreb central est inférieur à 650 m³/habitant/an, Ces ressources sont également très irrégulières (tableau I-1) dans le temps et dans l'espace (*Larabi et al, 2023*).

Tableau I-1 Les ressources renouvelables au Maghreb central (*AQUASTAT,2017*).

Pays	Ressources en eau renouvelables (m³/hab/an)
Algérie	281,9
Maroc	650
Tunisie	403,6

Cette situation risque de s'aggraver sous l'influence du changement climatique, En effet, il y a eu une augmentation des événements extrêmes au Maghreb au cours des dernières décennies et une diminution significative des précipitations et donc du ruissellement (Figure I-1) (*UNESCO, 2023*).

Les projections climatiques avec RCP (Representative Concentration Pathways) pour les pays du Maghreb central prévoient une diminution des précipitations (10 à 30 %) d'ici 2080-2099 (*Taabni et El Jihad, 2012 ; Lelieveld et al, 2016 ; Raymond et al,2019 ; Schilling et al, 2020 ; Mami,2020 ; Taïbi et al,2021*). Désormais, le changement climatique futur est la principale préoccupation des pays du Maghreb central. Une baisse importante des ressources en eau est attendue d'ici 2090/2099, qui pourrait atteindre 40% dans le nord du Maghreb central (*Tramblay et al, 2018 ,2020 ; Schilling et al, 2020*).

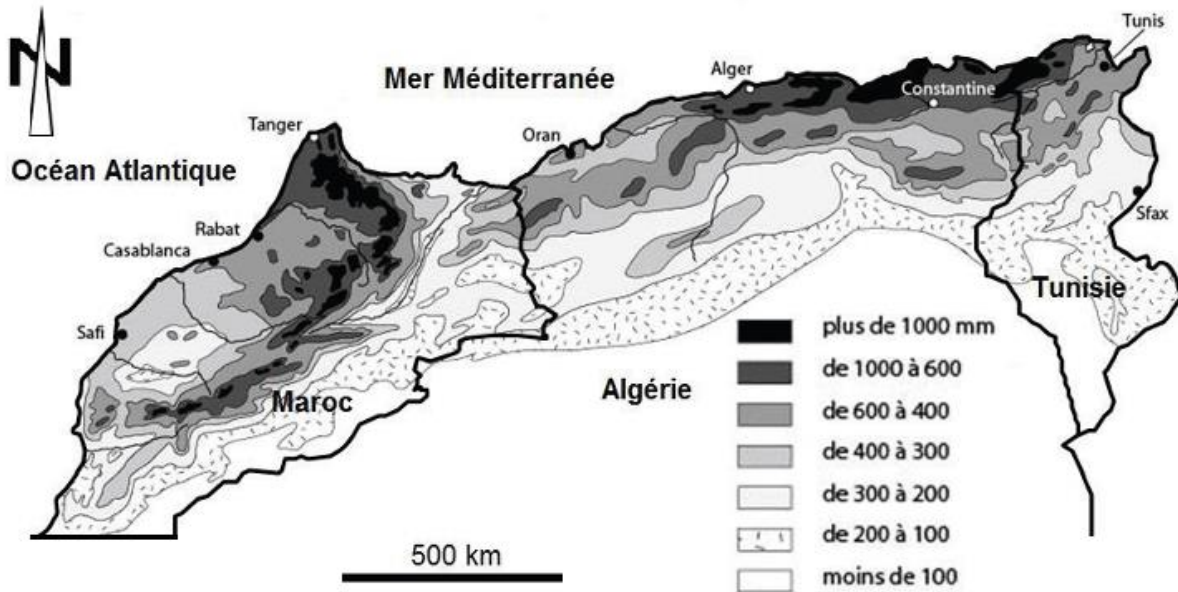


Figure I-1 Précipitations moyennes annuelles au Maghreb central (1960-2010) (Nouaceur et al, 2013).

Dans le cas des pays du Maghreb central, le changement climatique a déjà commencé à montrer ses effets. Entre 1960 et 1990, la température a augmenté de 0,2°C par décennie et ce rythme s'est accru depuis. Les conséquences pour une région avec des zones climatiques et des paysages locaux différents, même si la sécheresse est la principale caractéristique, ont tendance à subir (Conférence des Parties (COP 27, 2022) :

- Hausse de la température mondiale ;
- Augmentation de la pression sur les ressources en eau ;
- Augmentation, sinon en nombre, du moins en intensité des événements climatiques extrêmes (sécheresse, canicule, inondations) ;
- élévation du niveau de la mer conséquente.

Si les hausses de température sont bien observées dans le monde, « le changement climatique n'est pas un phénomène homogène dans le temps et dans l'espace », explique Samuel Somot, chercheur au Centre national de recherches météorologiques (CNRM) de Toulouse, en France. Selon lui, un réchauffement climatique de 2°C par rapport aux niveaux élevés d'avant 1900 de l'accord de Paris sur le climat correspondrait à une augmentation de 2,5°C en Europe continentale. Cependant, cela se traduirait par une élévation de plus de 3°C en Méditerranée. Ces dernières années, le climat méditerranéen s'est réchauffé plus vite que le reste du monde, et encore plus vite en été dans la région du Maghreb (figure I-2). Il va sans dire que les risques liés à la hausse des températures ne sont pas les mêmes en Europe scandinave et méditerranéenne.

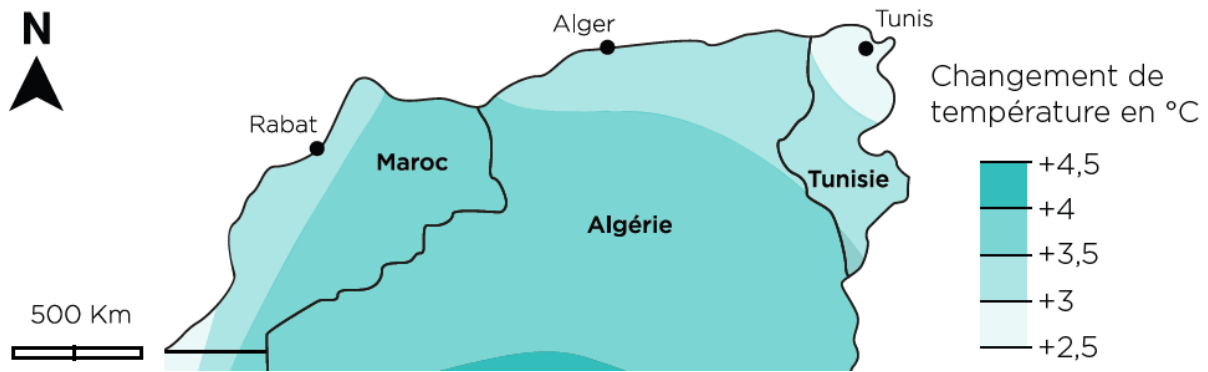


Figure I-2 Changement des températures annuelles au Maghreb central à l'horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles) (Bates et al, 2008).

Les météorologues et les climatologues pensent que les cyclones tropicaux ont contribué à l'augmentation des précipitations causée par le changement climatique. L'organisation météorologique mondiale (OMM) a rapporté que le changement climatique a entraîné une augmentation des conditions météorologiques de 20 à 50 % (OMM,2023).

La Tunisie est traversée par des masses d'air provenant de différentes sources et présente une forte saisonnalité. Les perturbations provenant de l'océan Atlantique, surtout en hiver, apportent de l'humidité plus ou moins de l'ouest, selon la trajectoire sur l'Afrique du Nord et les montagnes de l'Atlas et produisent ainsi des précipitations orographiques, surtout dans le nord du pays (Slimani et al, 2007 ; Feki et al, 2012,2017,2022 ; Hammami et al,2022). Au nord, le climat de la Tunisie est plutôt méditerranéen, caractérisé par des hivers doux (environ 20°C), des précipitations modérées (jusqu'à 700 mm/an dans les zones côtières) et des étés chauds et secs. Au sud, le climat est désertique, avec des étés extrêmement chauds (Beck et Mahony, 2018). La température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de 12,2°C, celle du mois le plus chaud (août) est de 28,6°C. Les précipitations s'élèvent à 485 mm par an et sont de type méditerranéen. La Tunisie pourrait connaître un phénomène de retour des épisodes extrêmes (tableau I-2), pouvant entraîner diverses perturbations et inondations, notamment de fortes précipitations, comme celles observées en 1969 et 1990 (Chebli et al,2019 ; Hmidi,2023).

Tableau I-2 Les épisodes extrêmes en Tunisie (2000-2018) (INM,2020).

Date	Phénomène météorologique exceptionnel	Lieu
Mai 2000	Inondation	Medjerda
Janvier 2003	Inondation	Medjerda
Septembre 2003	Inondation	Grand Tunis
Décembre 2003	Inondation	Medjerda
Janvier 2004	Inondation	Medjerda
Novembre 2004	Tornade	Kelibia
Février 2005	Neige	Jendouba, Béja, le kef
Février 2006	Inondation	Medjez el beb
Septembre 2007	Orage	Grand Tunis
Octobre 2007	Inondation	Sabelet ben Amma
Octobre 2008	Tornade	Bizetre
Avril 2009	Inondation	Medjerda
Septembre 2009	Tornade	Sahel
Septembre 2009	Inondation	Redeyef
Octobre 2011	Inondation	Medjerda
Février 2012	Neige	Ain Drahem
Février et Mars 2012	Inondation	Medjerda
Juin 2014	Inondation	Sud de la Tunisie
Février 2015	Inondation	Medjerda
Janvier 2016	Neige	Siliana
Mai 2016	Orage	Centre de la Tunisie
Juin 2016	Orage	Sud de la Tunisie
Septembre 2016	Inondation	Sahel et Sfax
Octobre 2016	Orage	Kasserine
Janvier 2017	Neige	Ain Drahem
Avril 2017	Orage	Sud de la Tunisie
Juin 2017	Orage	Grand Tunis
Novembre 2017	Orage	Sud de la Tunisie
Juillet 2018	Tornade	Jendouba,
Aout 2018	Inondation	Bizetre
Septembre 2018	Inondation	Cap Bon

L'Algérie, comme l'ensemble du Maghreb central, connaît des épisodes climatiques soudains et violents. Le pays connaît de nombreux épisodes d'orages et de grêle provoquant des inondations sur le continent, des canicules et des sécheresses. Le réservoir de Koudiet Asserdoune, l'un des plus grands barrages d'Algérie, s'est asséché. Début juin, le niveau de remplissage des barrages du pays était inférieur à 50 %, (ANBT,2021). L'Algérie, par sa topographie, sa morphologie et son climat, applique une approche géo climatique qui divise le territoire en trois grands groupes : les groupes tellien et côtier, montagneux et saharien. Dans le tableau I-3, une comparaison de ces trois ensembles d'un point de vue climatique est donnée (MADRP,2015).

Tableau I-3 Les trois ensembles géo climatiques de l'Algérie climatique (MADRP,2015).

Zones infranationales	Précipitations (mm)	Température (° C)	Humidité (%)	Evapotranspiration (mm)
Ensemble Tellien et littoral	400 à 1000	Min 2 à Max 30 Moy 17,5	Moy 60 à 70	Min 30/40 Max 200/240
Ensemble hauts plateaux et steppe	150 à 350	Min -2 Max 38 Moy 19	Moy 15	Min 45 Max 250
Ensemble saharien	-100	Min -5 Max 50 Moy 19	////	1500 mm

Le climat de l'Algérie passe d'un environnement méditerranéen humide à un environnement désertique en passant par un climat semi-aride. De plus, le climat algérien est influencé par la circulation atmosphérique des latitudes moyennes et la circulation tropicale et saharienne. Toutes les zones bioclimatiques méditerranéennes (figure I-3) sont représentées de la périphérie humide au Nord à la périphérie aride au Sud pour les phases bioclimatiques et du froid au chaud pour les variations thermiques (Khezazna,2017 ; Bouabdellah,2022). Les précipitations (tableau I-4) sont très inégalement réparties et les zones les plus vastes du pays sont celles qui ont le moins d'eau.

Tableau I-4 Les étages bioclimatiques en Algérie (Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables,2023).

Étages bioclimatiques	Pluviosité annuelle mm	Superficie en ha	Pourcentage de la superficie totale %
Per humide	1 200 à 1 800	185,275	0,08
Humide	900 à 1 200	773,433	0,32
Subhumide	800 à 900	3 401,128	1,42
Semi-aride	300 à 600	9 814,985	4,12
Aride	100 à 300	11 232,270	4,78
Saharien	< 100	212 766,944	89,5

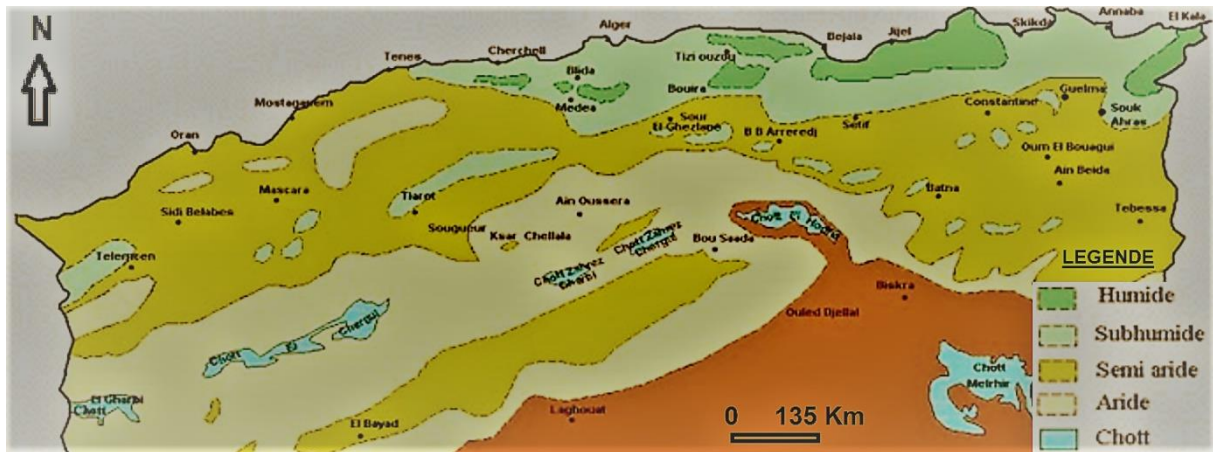


Figure I-3 Etages bioclimatiques de l’Algérie de Nord (Nedjraoui et Bédrani,2008).

En Algérie, le mercure est même monté à 48°C à Tizi-Ouzou, Béjaïa, Jijel, Skikda, Annaba et El-Tarf à l’été 2021. En Tunisie à la mi-août 2021, le thermomètre de Tunis enregistrait 48 degrés, battant le précédent record de 46,8 degrés établi en 1982, tandis que Béja était même le quatrième endroit le plus chaud du monde avec une température de 48,9 °C. Les températures au Maroc à l’été 2021 dépassaient largement les 45 degrés et atteignaient ainsi le record absolu de chaleur jamais mesuré (Jaldi, 2022). La température moyenne annuelle au Maroc a atteint une valeur d’environ +20,1°C, la valeur la plus élevée depuis 1981 ; cela représente une anomalie d’environ +1,4°C par rapport à la normale climatique calculée pour la période 1981-2010, Par ailleurs, 2020 a été l’année la plus chaude jamais enregistrée au Maroc, devant 2010 et 2017 (Lionboui et al,2022).

Au Maroc, la pluviométrie annuelle moyenne en 2020 a été bien inférieure à la normale climatique, cette accumulation est proche du record des années les plus sèches jamais enregistrées en 1981, 1983 et 2001, classant 2020 parmi les quatre années les plus sèches depuis 1981. Le Maroc a connu 25 phénomènes météorologiques extrêmes et a fait l’objet d’avertissements météorologiques, certains de ces événements extrêmes ont causé des dégâts. Les phénomènes météorologiques violents en 2022 se répartissent comme suit (figure I-4) : orages majeurs (44%), canicules (20%), chutes de neige (20%), et vents forts (16%) (Lionboui et al,2022).

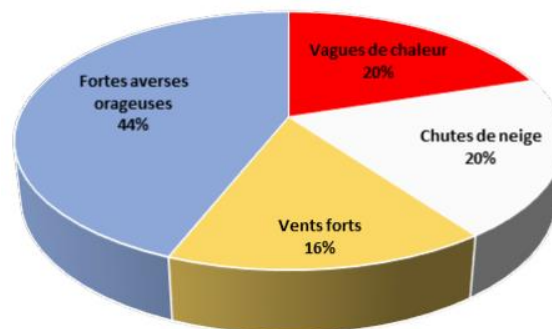


Figure I-4 Pourcentage des phénomènes météorologiques intenses au Maroc en 2022, (Crop Growth Monitoring System – Maroc (CGMS-Maroc,2024).

I- 3- La sécheresse aux pays de Maghreb central

Barrages peu remplis, nappes phréatiques surexploitées, pluviométrie au plus bas. Il est grand temps que les pays de Maghreb central prennent la mesure des pénuries d'eau qui les guettent. En Afrique du Nord, la disponibilité de l'eau courante a diminué de 60 % en seulement quarante ans (Remini et al, 2015).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et le World Resources Institute (WRI) ont publié des rapports indiquant qu'il existe un stress hydrique important au Maghreb central (GIEC, 2023). De 2015 à début 2023, le Maghreb central a été touché par intermittence par la sécheresse de ces dernières années, Le secteur le plus touché par la sécheresse c'est le secteur d'agricole, selon un récent rapport de la FAO. L'indice de précipitation standardisé (SPI) est utilisé pour évaluer le climat, l'agronomie et l'hydrologie du Maghreb central en mesurant son déficit de précipitations sur différentes échelles de temps (figure I-5) (FAO, 2023).



Figure I-5 Indice de précipitation normalisé (SPI) sur deux années terminant en janvier 2023 (Toreti et al, 2023).

Tous les pays du Maghreb central ont été particulièrement touchés par la sécheresse. Les conséquences sont évidentes. Moins de précipitations signifie une production économique plus faible, une perte de revenus pour les agriculteurs, des pertes d'emplois et une urbanisation accélérée, une industrie en croissance, des infrastructures vieillissantes et une mauvaise gestion exacerbent la pénurie croissante. Les aquifères s'assèchent en raison de l'exploitation minière intensive par des industries gourmandes en eau. Depuis plusieurs décennies, les pays du Maghreb central développent une politique dite développement rural dans les zones périphériques. Mais la sécheresse nécessite d'être anticipée pour gérer les conséquences et les zones sensibles doivent être signalées par mécanismes de suivi, collecte régulière de données pertinentes, qui fournit des indices. Il apparaît donc que la définition et la production des bulletins d'alerte précoce à la sécheresse le premier défi, la première étape pour faire face et prévenir les catastrophes climatiques. Le défi de la coordination multisectorielle des gouvernements centraux. Le défi que prescrit également la création de sociétés transfrontalières, qui permettent toutes deux leur préservation comme une meilleure compréhension des phénomènes climatiques dans leur dimension régionale. À cette échelle, comprendre comment les types de sécheresse apparaissent et se propagent pour faire cela les prévenir est un grand défi (OSS, 2009).

I- 3-1 Tunisie

Au cours du 20e siècle, la Tunisie a connu plusieurs sécheresses majeures. Mais ces phénomènes n'ont pas touché toutes les décennies avec la même fréquence. Par exemple, les années 1950-1951 et 1970-1971 ont été marquées par de rares années de sécheresse. En revanche, les années 1920-1921, 1940-1941, 1960-1961 et 1980-1981 ont connu des sécheresses pluriannuelles, une vaste expansion spatiale et des déficits pluviométriques importants (Henia, 2001). La sécheresse des années 1960-1961 a occupé toute la période allant de 1960-1961 à 1968-1969. C'est une période de précipitations très faibles à faibles. Au cours des années 1980, les années avec des précipitations inférieures à la moyenne ont prévalu sur les bonnes années. La fin de la décennie (1987-1988 à 1988-1989) a connu une sécheresse importante avec de graves déficits pluviométriques affectant l'ensemble du pays, à l'exception de l'extrême Sud-Est, où ce déficit s'élève à plus de 60 % en moyenne dans de nombreuses stations du Centre et du Sud-Ouest en 1987-1988. Le taux de remplissage des barrages en Tunisie, qui avait atteint un niveau préoccupant de 19,6% fin novembre 2024, a légèrement augmenté pour atteindre 21,2% au 23 décembre 2024. Cette amélioration, même si elle est prometteuse, demeure insuffisante face à une situation hydrique toujours inquiétante (ONAGRI, 2024 ; Mathlouthi et Lebdi., 2024).

A titre d'exemple, dans le Centre de la Tunisie, il y a eu une sécheresse quasi continue de 2012 à 2023, cela a eu de nombreuses conséquences, notamment pour le secteur agricole. Les rendements des cultures pluviales (céréales) et les stocks fourragers ont diminué. Des tensions sont apparues au sujet de l'utilisation de l'eau et des terres, entre éleveurs et agriculteurs, les déficits d'approvisionnement en eau dans les réservoirs des barrages en Tunisie ont dépassé 60 % au premier semestre 2023 (FAO, 2023). La série chronologique 1950-2013 dans le bassin de la Medjerda montre une prépondérance des années modérément sèches (figure I-6). La succession des années sèches est souvent structurelle dans les séries enregistrées en Tunisie. Par analogie avec les pays du Maghreb (similitudes météorologiques, hydrologiques, agroécologiques), ce constat peut être extrapolé à l'ensemble de la région du Maghreb sans différences majeures (Lebdi et Maki, 2023).

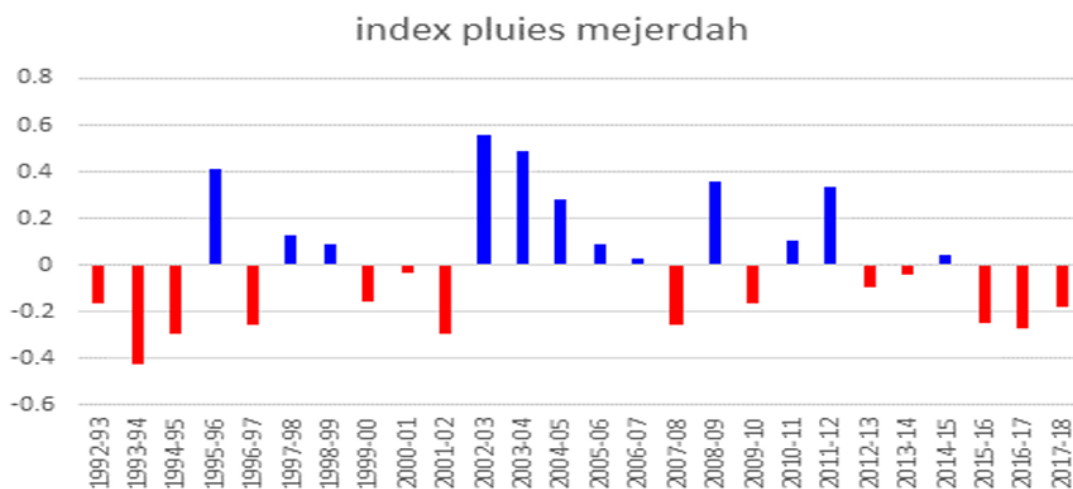


Figure I-6 Indice centré réduit calculé pour les pluies annuelles - (événements secs en rouge) - Medjerda -Tunisie (Lebdi et Maki, 2023).

Neuf (09) stations sélectionnées pour analyser les précipitations entre 1970 et 2011. L'Institut National de Météorologie (INM) pour la Tunisie a fourni les données de cette étude. Cette recherche utilise le calcul d'indice centré réduit et le traitement statistique utilisant la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI). Par la suite, des sécheresses se sont produites en Tunisie (figures I-7), et ces conditions ont été observées entre 1987 et 2002. En Tunisie, cette période mouvementée a duré 16 ans. L'indice régional montre que près de 63 ans sont négatifs. Les phases successives d'une même tendance durent jusqu'à trois ans (1987-1989 et 2000-2003 pour les indices centrés réduits négatifs, 1995-1997 pour les indices positifs). Les quatre années 1988 (-1,36), 1989 (-1,03), 1993 (-1,46), 2000 (-1,68) et 2001 (-1,46) sont caractérisées par des indices négatifs supérieurs à -1. Les années de classes sèches et très sèches totalisent près de 55 % pour toutes les stations. Les années humides et très humides ne représentent que 22,90 % (Nouaceur et al, 2013).

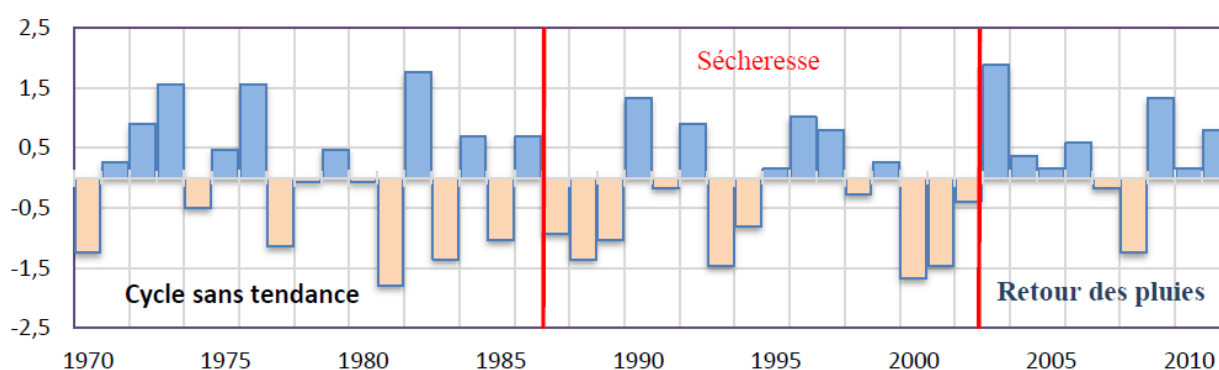


Figure I-7 Indice centré réduit en Tunisie calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011) (Nouaceur et al,2013).

I- 3-2 Algérie

En Algérie, la sécheresse est une préoccupation majeure au niveau hydrologique, les ressources en eaux de surface étant très sensibles aux changements climatiques. Au cours du siècle dernier, l'Algérie a connu plusieurs périodes de sécheresse, la plus extrême en 1910 et 1940 et la plus persistante en 1975-80 ainsi qu'au début de ce siècle (Zitoun, 2019). Une étude du développement hydro-agricole au centre du pays, confirme que la période 1950-1975 a été plus humide que la moyenne à long terme ; tandis que depuis 1977, on assiste à une sécheresse assez prononcée, sans précédent depuis le début des observations (Donald et Partners, 1997). Une récente sécheresse qui affecte le pays depuis deux décennies est devenue particulièrement grave, plusieurs auteurs commentant sa gravité dans l'ouest, on cite (CRSTRA,2010 ;Belarbi et al,2016 ; Khezazna,2017 ; Touitou et Abul Quasem ,2018 ; Zitoun,2019 ; Djellouli et al ,2016,2019 ; Derdour et al 2022,2023 ;Diaf et al,2024 ; Oubadi et al,2024).

L'Algérie a connu une diminution des précipitations d'environ 30 % au cours des deux dernières décennies, entraînant des conditions météorologiques déplorables. Les précipitations à l'Ouest ont diminué de 25 à 30 % et devraient encore baisser, jusqu'à environ 40 % en 2022 et 2023. Au Centre, il n'y en a que 30 % et à l'Est, encore un peu moins (Djaffar et Kettab,2018).

Le volume total mobilisé au niveau de l'ensemble des barrages algériens en exploitation est de 2,3 milliards de m³, correspondant à un taux de remplissage de 32,58%. Concernant la situation de l'eau par région, les données de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT,2021) montrent clairement que l'apport enregistré dans la partie occidentale du pays a atteint 1 493 600 m³, portant le volume mobilisé à 207,82 millions de m³, ce qui signifie le taux d'occupation de 22,60 %. La région centre a enregistré une contribution de 9 794 000 m³, augmentant le volume mobilisé à 150,14 millions de m³ et le taux d'occupation a atteint 08,86%. Dans la région de l'Est, la contribution enregistrée a atteint 4 529 000 m³, correspondant à un volume mobilisé de 1,66 milliard de m³, et un taux d'occupation de 57,65%. Toutefois, l'ANBT souligne que 46 barrages ont un taux de remplissage inférieur à 30% (ANBT, 2021). Le barrage de Koudiat Asserdoun, l'un des plus grands du pays, avait un taux de remplissage de 3% début 2023, alors que les besoins en eau de la capitale étaient officiellement estimés à 700 000 m³ par jour, atteindraient plutôt 1,2 à 1,3 million de m³ (Remini et al,2019).

L'analyse des données pluviométriques de certaines stations météorologiques algériennes (Biskra, El Oued) révèle qu'il existe des périodes sèches et humides intermittentes de durée variable, généralement d'une durée de quatre ans ou moins et extrêmement de huit ans. Les années sèches représentent un tiers de la chronologie de 90 ans observée, mais si l'on inclut les années normales, plus de 70 % sont soit normales, soit sèches (tableau I 5). Lorsqu'il y a des ouvrages de stockage, seulement une année sur trois est considérée comme une année humide, ce qui inonde les années sèches (Aziz et al, 2007 ; Boutouga ,2021 ; Bessaklia,2021).

Tableau I- 5 Séquences sèches, normales et humides (Aziz et al, 2007 ; Boutouga ,2021 ; Bessaklia,2021).

Site	Années humides	Années normales	Années sèches	% d'années sèches
Mecheria	30	30	33	40
El Oued	33	10	40	48
Biskra	39	10	39	44

La plupart des événements climatiques dans les régions semi-arides d'Algérie sont secs et les déficits pluviométriques sont causés par la production agricole pluviale, le lessivage des eaux saumâtres (notamment dans les oasis), ou les nappes phréatiques de surface et l'accès aux points d'eau pour l'élevage et la transhumance (Aziz et al, 2007 ; Boutouga ,2021 ; Bessaklia,2021).

Une analyse des données pluviométriques de l'Algérie cherche à démontrer la variabilité spatiale significative associée à l'impact du relief et de la position latitudinale. De 1970 à 2011, douze (12) stations en Algérie ont été choisies pour leur analyse des précipitations. Les données utilisées dans cette étude, c'est de l'ONM (Office National de Météorologie) en Algérie. L'étude s'appuie sur le calcul de l'indice centré réduit et un traitement statistique réalisé selon la méthode graphique chronologique de traitement de l'information au type « Matrice Bertin » (MGCTI). L'Algérie a connu une régression progressive vers des conditions plus humides depuis le début des années 2000. Par la suite, des

sécheresses se sont produites en Algérie (figures I-8), et ces conditions ont été observées entre 1987 et 2002. En Algérie, l'indice centré réduit pour cette période était négatif à près de 68%, alors que pour les valeurs positives il était de 31,25%. La période de sécheresse ne dépasse pas 3 années consécutives. Des valeurs extrêmement négatives pour cette phase ont été enregistrées en 1989 (-1,68), 2000 (-1,87) et 2001 (-1,49). Au cours de cette période, 55,60 % des années ont été considérées comme des années sèches et très sèches, avec seulement 26,58 % des années humides et très humides combinées (Nouaceur et al,2013).

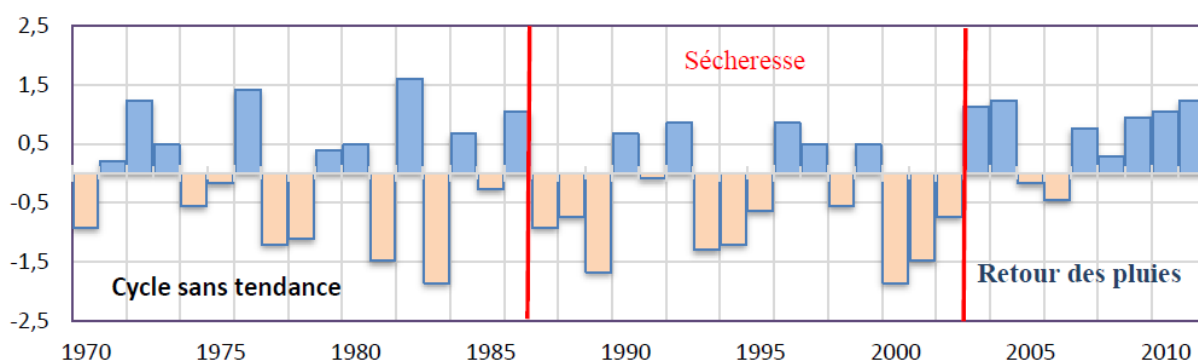


Figure I-8 Indice centré réduit en Algérie calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011) (Nouaceur et al,2013).

I- 3-3 Maroc

Au cours du 20e siècle, le Maroc a connu plus de 10 périodes sèches majeures, dont la durée s'est étendue à la majeure partie du pays et dont l'intensité est modérée. Cela s'est produit en 1917-1920, 1930-1935, 1948-1950, 1960-1961, 1974-1975 et 1991-1993. Toutefois, les années les plus extrêmes furent les années 1931-1934, 1944-1945, 1982-1984, 1994-1995 et 1999-2000. La fréquence des sécheresses, d'une sur cinq avant les années 1990, est devenue une sur deux au cours de la dernière décennie du 20e siècle. Ainsi, les études sur l'évolution et les tendances des précipitations au Maroc au cours des 45 dernières années montrent une tendance à la baisse significative des précipitations cumulées pendant la saison des pluies dans le Nord-Ouest et des précipitations printanières à l'échelle nationale, augmentant les périodes significatives au cours de l'année de sécheresse, notamment en février -Mars-avril, important pour l'agriculture nationale et réduisant le nombre total de jours de pluie annuels. On trouve au Maroc tous les types de sécheresse, et leur impact sur la fourniture d'eau potable et d'irrigation entraîne des restrictions de plus en plus fréquentes. Par exemple, ces restrictions ont eu lieu dans certaines grandes villes (Marrakech, Tétouan, Tanger) au cours des années 1983, 1993 et 1995, allant de 25 à 50 % de leurs besoins, ainsi que pour la fourniture d'eau d'irrigation où les déficits enregistrés ont été de 10 à 90 % durant les cycles de sécheresse, au cours des années 1980-1985 et 1991-1995 (Driouech et al,2021).

Depuis le début des années 1980, le Maroc a connu une augmentation de la fréquence, de la gravité et de la durée des sécheresses. Les réservoirs des principaux barrages n'ont pas dépassé un taux de remplissage de 20 % au cours des trois dernières années (Hadri et al, 2021). La sécheresse augmentera progressivement au Maroc jusqu'en 2050 en raison de la diminution des précipitations (-11%) et de

l'augmentation des températures (+1,3°C), Cela entraînera « une réduction de plus de 25 % de la disponibilité en eau (Hadri et al, 2021).

En raison du changement climatique persistant, le pays subit un grave déficit pluviométrique depuis septembre 2021 et une baisse alarmante des réserves de barrage de près de 89 % par rapport à la moyenne annuelle (Bouramdane,2023).

Outre les facteurs environnementaux, la forte demande en eau et la surexploitation des eaux souterraines contribuent à la pression sur les ressources en eau, la rareté de l'eau est profondément liée à la manière dont elle est utilisée. Cette ressource destinée à l'irrigation consomme environ 80 % de l'eau du Maroc chaque année (Houmma et al,2025).

Au Maroc, une classification SPI a été développée qui affiche la distribution temporelle des années sèches et humides à l'aide SPI. Les années humides représentent 26 % du total, tandis que les années sèches représentent 38%. Dans les années 1980, les sécheresses étaient persistantes et duraient 3 à 5 années consécutives, tandis que celles des années 1990 étaient plus fréquentes (figure I-9 et tableau I-6) (Sebbar et al, 2019).

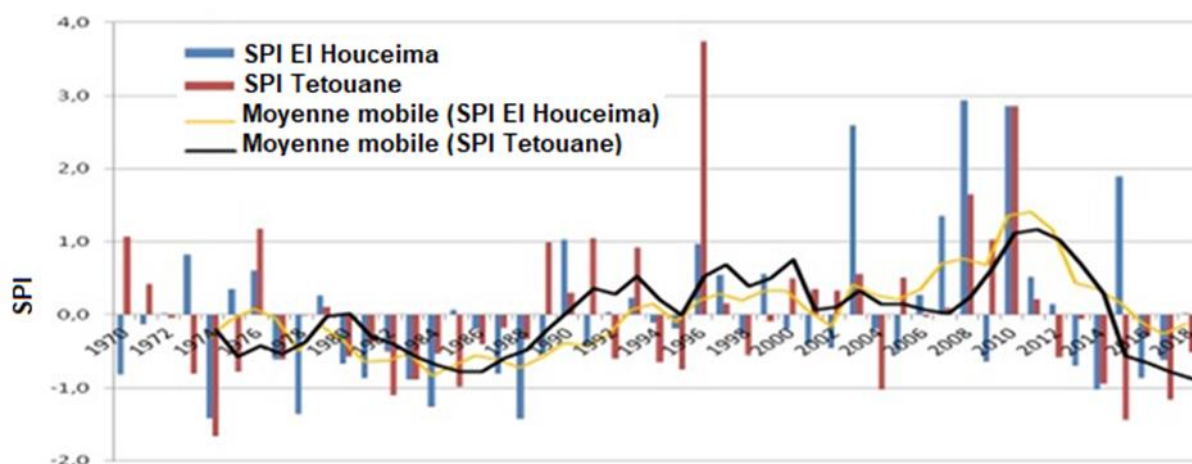


Figure I-9 Évolution annuelle de l'indicateur (SPI) à El Houceima et Tetouan (Maroc) (Sebbar et al, 2019).

Tableau I-6 Pourcentage des années climatiques observées entre 1970 et 2018 à El Houceima et Tetouan (Maroc) selon l'indicateur (SPI) (Sebbar et al, 2019).

Catégorie	Pourcentage
Humide	26
Normale	36
Sèche	38

L'examen des données pluviométriques marocaines vise à révéler des variations spatiales significatives liées aux caractéristiques du relief et de la latitude. Quatorze (14) stations sélectionnées pour analyser les précipitations entre 1970 et 2011. La Direction Nationale de la Météorologie (DNM) du Maroc a fourni

les données de cette étude. Cette recherche utilise le calcul d'indice centré réduit et le traitement statistique utilisant la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI). Au Maroc, les connaisseurs parlent d'un remplissage à 30 % des barrages, d'une exploitation excessive des nappes phréatiques et d'une politique de dessalement et de recyclage des eaux usées et pluviales encore balbutiante. Cette région du Maghreb central a été frappée par une sécheresse climatique de 1980 à 2001, on distingue trois saisons sèches (indices régionaux négatifs), qui s'entrelacent avec deux saisons humides (1988-1990) et (1995-1997) (figure I-10). Par conséquent, sur le long terme de plus de 20 ans, seuls 30 ans ont été positifs pour l'indice régional. Pour les différentes stations étudiées, le pourcentage d'années sèches et très sèches était de 49,01 %, celle des années normales 18,75 % et les années humides et très humides de 32,23. Les Marocains ont été témoins d'une sécheresse climatique grave et durable depuis les années 1980 et un retour progressif vers des conditions plus humides à partir de 2008 (Nouaceur et al, 2013).

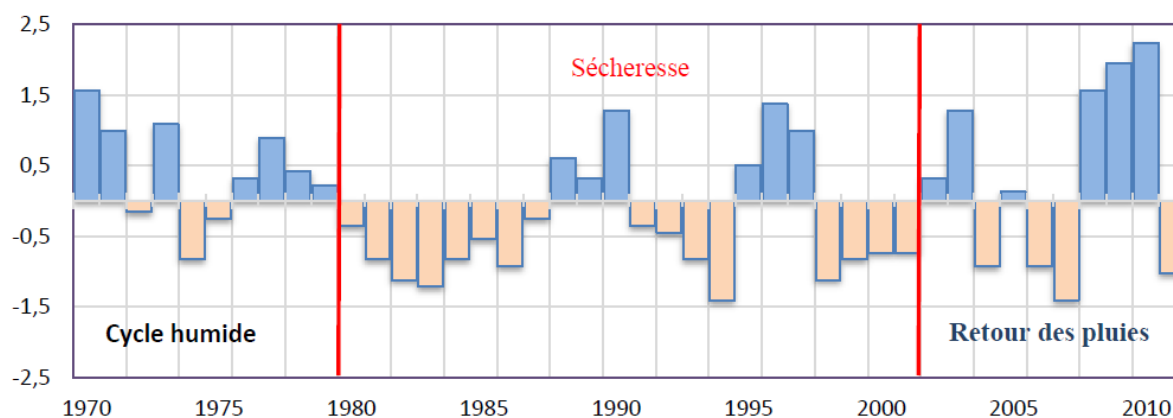


Figure I-10 Indice centré réduit au Maroc calculé à partir de la somme des codes attribués aux différentes années selon le classement pluviométrique par rapport aux valeurs de dispersion (quintiles) (1970 - 2011) (Nouaceur et al, 2013).

I- 4- Impact de la sécheresse sur le cycle de l'eau aux pays de Maghreb central

La sécheresse, ou le manque de précipitations, provoque la désertification dans certaines zones, en particulier comme c'est le cas autour des pays de Maghreb central. Plus largement, selon les Nations Unies (ONU), 2 milliards de personnes dans le monde sont victimes des effets de la désertification. Contrairement aux idées reçues, la désertification ne se limite pas aux régions arides mais touche près de la moitié de la planète. Ce phénomène de dégradation des terres peut être causé par des facteurs naturels et/ou anthropologiques. De grands changements climatiques peuvent conduire à la désertification, cependant, les actions des individus ont un impact majeur sur la perturbation de l'eau. L'eau qui s'évapore de la zone revient sous forme de pluie, s'infiltré dans le sol, contribue à la croissance des plantes, puis s'évapore à nouveau. Les deux tiers des précipitations au sol sont généralement fournis par le cycle hydrologique local. Cependant, si cela s'effondre, la désertification progressera et l'équilibre de l'écosystème s'effondrera en raison des pénuries d'eau. Le sol s'est détérioré,

l'environnement local s'est détérioré et le cadre de vie des habitants s'est détérioré en conséquence (CRSTRA,2020 ; ONU,2022). Les déficits par rapport à la moyenne pluviométrique ont été constatés dans plusieurs régions du Maghreb central depuis le début de l'année 2021 (GDO, 2023).

Les pays du Maghreb central continuent de faire face à un état d'urgence face à la sécheresse, avec des restrictions d'utilisation de l'eau limitées pour atténuer les dégâts. Malgré son rôle important dans le changement climatique, le lien entre le climat et le cycle hydrologique n'a jamais été pris en compte dans les accords internationaux sur le climat. Mais cette relation essentielle explique une grande partie du changement climatique actuel, y compris la question de la sécheresse. Selon les Nations Unies (ONU,2022), le monde est « à la croisée des chemins dans la lutte contre la sécheresse », les sécheresses augmentant de 29 % en une génération et s'aggravant. L'humanité est "à la croisée des chemins" pour faire face à la sécheresse et le confinement doit être accéléré "de toute urgence et par tous les moyens", (Bertola, 2003 ; Bessaoud ,2006 ; Nedjraoui et Bedrani ,2008 ; Arbaoui,2018 ; Raymond et al,2019).

Les pays du Maghreb central reconnaissent l'importance de la lutte contre la sécheresse et la désertification, mais les activités humaines continuent de dégrader les terres. La surexploitation des sols (agriculture intensive, déforestation, industrialisation, détournement d'eau, surpâturage, etc) entrave la régénération des sols et accélère l'érosion des sols. Ce dernier réduit la perméabilité du sol et régénère peu les nappes phréatiques. Les impacts de la sécheresse, qui affectent non seulement le climat mais aussi les économies et les migrations. Dans les pays du Maghreb central, la difficulté d'accès aux ressources en eau a entraîné des déplacements de population, voire des conflits fonciers. Le manque d'eau et la détérioration des terres entravent la production agricole, engendrent un cercle vicieux de pauvreté et accroissent le risque de malnutrition.

En Tunisie, l'indice de précipitations standardisé SPI montre une séquence sèche persistante en avril et octobre 2021 et puis en 2022. L'intensité de l'événement est considérée assez faible (SPI entre -1 et 1) de mars à octobre (hormis les mois d'été). L'événement sec en Tunisie se caractérise par des valeurs du SPI > -2 entre octobre 2022 et janvier 2023 (figure I-11), à savoir pendant les mois de besoins en eau pour les semis des grandes cultures.

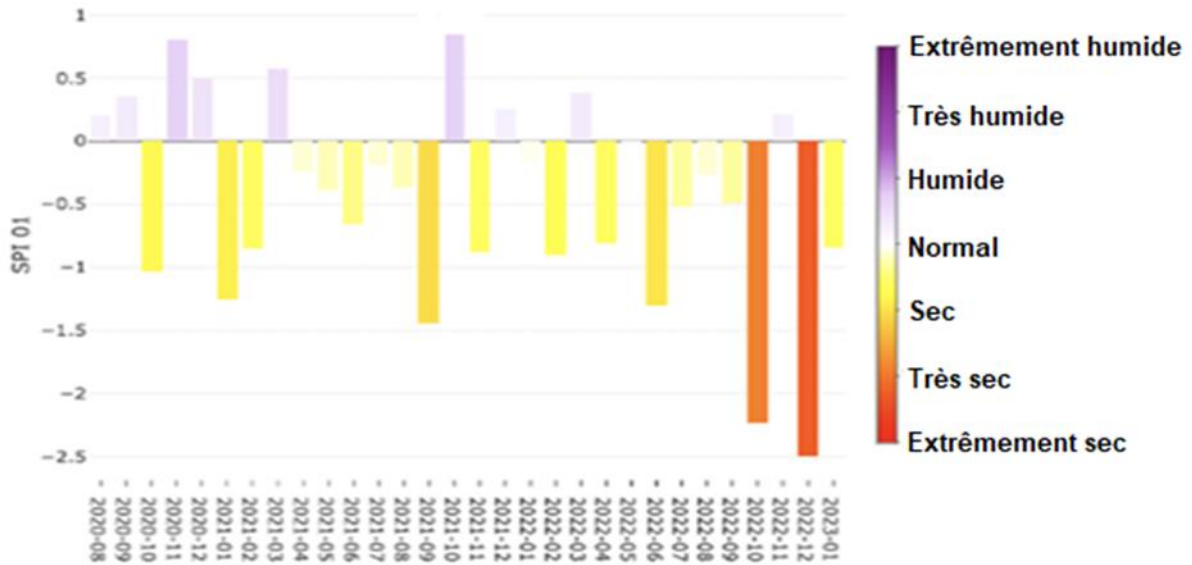


Figure I-11 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, en Tunisie (GDO,2023).

En Algérie (figure I-12), la séquence sèche est plus longue mais aussi moins sévère que celle observée en Tunisie.

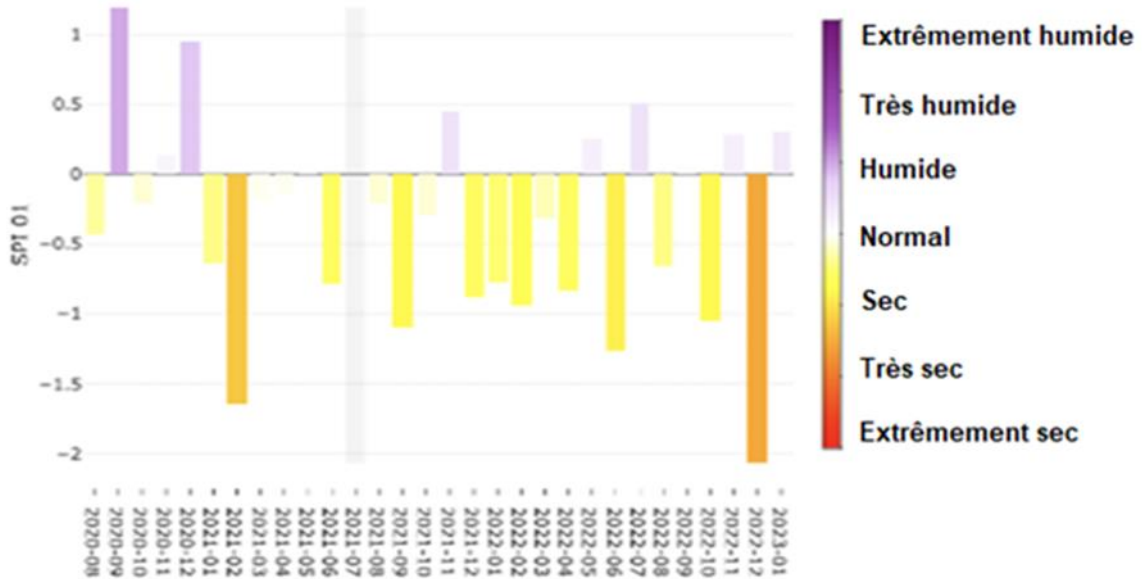


Figure I-12 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, en Algérie (GDO,2023).

Au Maroc (figure I-13), la sécheresse est plus longue et moins sévère qu'en Tunisie ou en Algérie entre 2021 et 2022. Ceci est illustré dans la figure I-13 (FAO,2023).

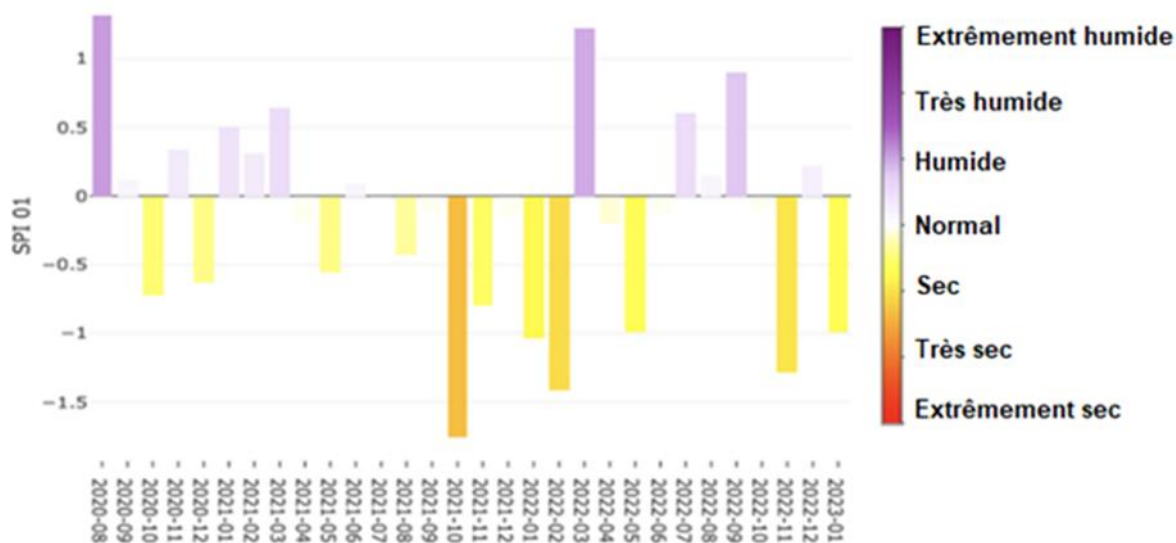


Figure I-13 Indices de précipitation normalisés (SPI) pour la période 2021-2022, au Maroc (GDO,2023).

I- 5- L'hydrologie aux pays de Maghreb central

Les pays du Maghreb central dans la partie nord-ouest du continent africain sont non seulement très similaires géographiquement, mais présentent également les mêmes contrastes topographiques, (figure I-14). Une étroite plaine côtière est suivie par les montagnes de Tell en Algérie et les montagnes de l'Atlas au Maroc, suivies de vastes zones désertiques couvrant les cinq sixièmes d'une superficie d'environ cinq millions de kilomètres carrés. La sécheresse augmente de la plaine côtière à la frontière saharienne, les précipitations uniquement dans les zones montagneuses (Slimani et al,2007 ; Chabour et al, 2018).

Les effets de la sécheresse sur l'hydrologie dans les pays du Maghreb central comprennent les pertes forestières prévues en cas de réchauffement de 3°C par rapport au risque actuel (Ghribi et Dahech., 2023) ; les pertes économiques liées à la sécheresse en Afrique au cours des 50 dernières années s'élèvent à 70 milliards de dollars (OMM, 2023) ; la probabilité d'être tué par des inondations, des sécheresses et des tempêtes est 15 fois plus élevée dans les régions très vulnérables par rapport aux régions très peu vulnérables entre 2010 et 2020 (GIEC, 2023).

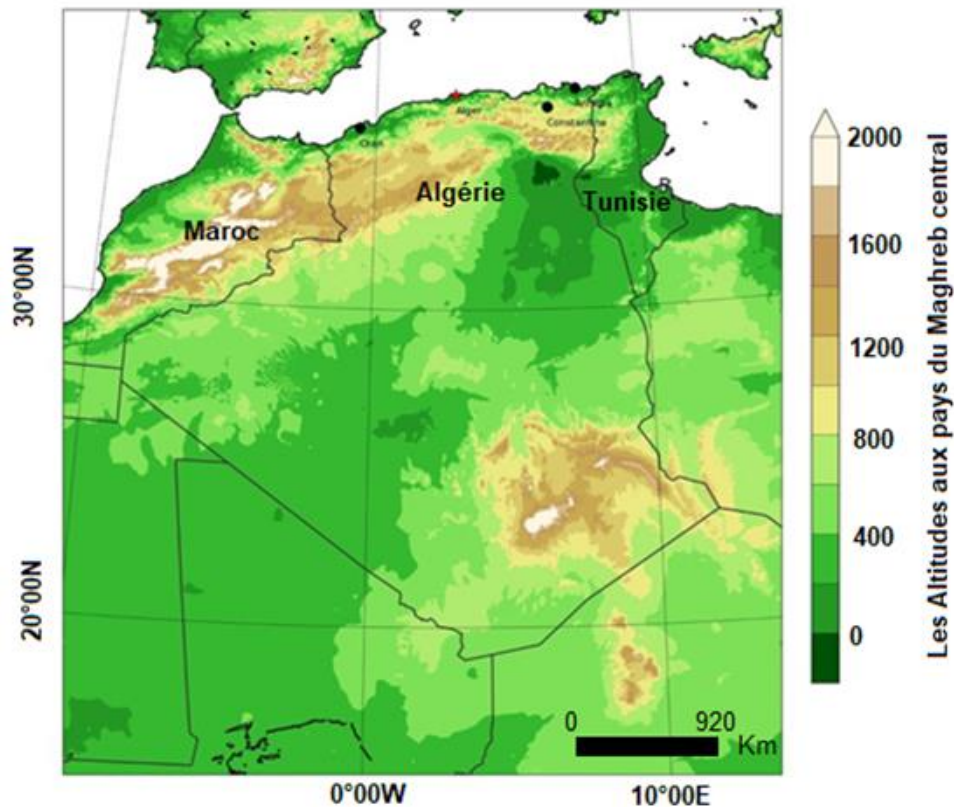


Figure I-14 Altitudes aux pays du Maghreb central (Jelassi et al, 2016).

Le climat du Maghreb central se caractérise par une sécheresse prononcée en été et des précipitations maximales en automne ou en hiver selon les régions (Tassin,2012;Khezazna,2017 ;Taïbi et al,2017,2019,2021; Renima et al,2022).

Près d'un tiers des perturbations du Maghreb central proviennent de l'océan Atlantique. Dans la partie orientale du bassin méditerranéen, le système stellaire perturbé est réactivé lors de son transit par la mer Méditerranée. L'importance de cette masse d'eau au niveau régional (cette mer intérieure s'étend sur quelque 4000 km du détroit de Gibraltar à la côte libanaise, avec une superficie totale de 2,51 millions Km²) explique sa vaste étendue spatiale de la zone climatique méditerranéenne. Les cellules actives restantes impliquées dans cette région sont d'origine locale et sont associées au contraste thermique de la masse d'air (Nouaceur et Murărescu,2016).

Les précipitations transitoires avec des valeurs moyennes comprises entre 300 mm et 1048 mm associées aux caractéristiques environnementales ci-dessus favorisent les débits fluviaux à forte variabilité saisonnière et interannuelle. Ces écoulements violents transportent des charges sédimentaires élevées car l'érosion mécanique se produit sur des terres chimiquement altérées (Taabni et El jihad,2012 ;Jelassi et al,2016 ; Woillez,2019 ; Sebbar et al,2022). La figure I-15 montre que les précipitations (mm,an⁻¹) sont inclinées d'Ouest en Est.

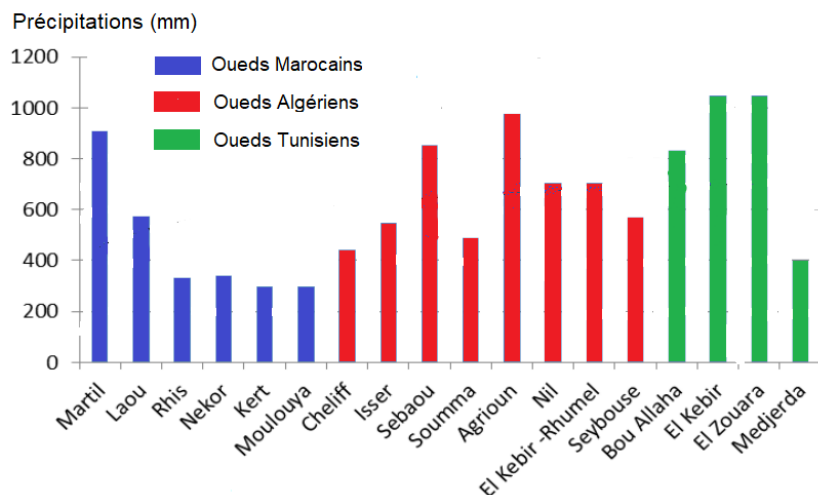


Figure I-15 Précipitations des Oueds Maghrébins central d'Ouest en Est, du Maroc jusqu'en Tunisie (Quinquis, 2017).

I- 6- Le transport solide aux pays de Maghreb central

Le nord du Maghreb central présente l'un des taux de transport de sédiments en suspension les plus élevés du bassin par unité de surface, avec une moyenne estimée à $500 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Bouchelkia, 2011 ; Bouanani et al, 2013 ; Kheniche et al, 2019 ; Ghernaout et al, 2020 ; Elahcene et al., 2022). Des travaux récents (Bkhairi, 2012 ; Bakreti et al, 2013 ; Ben rhouma, 2018 ; Aserar, 2019 ; Ghernaout et al, 2020 ; Zahar, 2021 ; Ennassiri et Mouak, 2021 ; Khemiri et Jebari, 2021 ; Sebbar et al, 2022 ; Elahcene et al, 2022 ; Sghaira, 2022 ; Aissaoui et Ben ghazi, 2023) ont conclu que les dégradations spécifiques sont très variables d'un bassin à un autre. Les quantités maximales enregistrées dans les pays du Maghreb central sont importantes. On note en Algérie $7200 \text{ t/km}^2.\text{an}$ (Oued Agrioun). Par contre les valeurs moins fortes de la dégradation spécifique est estimé à $318 \text{ t/km}^2.\text{an}$ au bassin versant de Tebarga en Tunisie centrale. Sur cette problématique du transport solide dont l'étude est devenue essentielle, un grand nombre de chercheurs ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes de ce phénomène et de quantifier les volumes des sédiments transportés, nous citons par exemple les travaux de (Benkhaled et Remini, 2003 ; Achite et Meddi, 2004 et 2005 ; Achite et Ouillon, 2007 ; Bakreti et al, 2013).

Depuis plus de 50 ans, toutes les études sur la sensibilité du Maghreb central à l'érosion hydrique, transport des sédiments et l'envasements des barrages s'accordent, elles diffèrent par les valeurs moyennes à prendre, les différentes méthodes et modèles utilisés aboutissent souvent à des conclusions différentes (Probst et Amiotte Suchet, 1992). Hadjadj (1997) a évalué l'érosion à $120.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ et l'envasement des barrages augmente de façon remarquable d'une année à une autre, passant de 484.10^6 m^3 en 1996 (Djeziri, 1998) à 700.10^6 m^3 en 1999 (Remini et al, 1999). Walling (1984) a estimé les dégradations spécifiques dans le Maghreb entre 1000 et $5000 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Dans les zones semi-arides, le climat est rude et les précipitations sont intenses et abondantes pendant la saison hivernale. Durant la saison d'automne où nous assistons à une absence de couverture végétale, les crues à forts débits sont brèves et dévastatrices. Les flux solides exportés à l'exutoire sont

alors très élevés (Yles et Bouanani, 2017, Diaf et Ghenim, 2021). Ce phénomène aggravant de transport solide engendre des conséquences sur le problème d'envasement des barrages Algériens.

D'une façon générale, il a également été mis en évidence que les fleuves des très grands bassins versants sont soumis à la sédimentation locale, au sein du bassin, entre leur source et leur embouchure, réduisant ainsi la quantité de matériaux réellement transportés jusqu'à l'exutoire (Milliman et Meade, 1983).

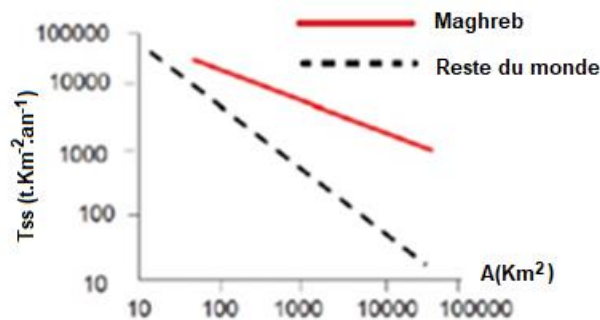


Figure I- 16 Importance de la sédimentation locale au sein du bassin versant : particularité du Maghreb central (Probst et Amiotte Suchet, 1992).

Nous pouvons voir sur la figure I-16 que la sédimentation locale a une importance grande dans les régions semi-arides du Maghreb central que dans le reste du monde, comme l'ont démontré (Probst et Amiotte Suchet, 1992), cette caractéristique est due à la taille modeste des bassins versants maghrébins, à leurs fortes pentes, et au caractère souvent torrentiel des écoulements liquides (Quinquis, 2017).

I- 7- L'effet de la sécheresse sur l'hydrologie et le transport solide au Maghreb central

À la 15e session de la Conférence des Parties (COP15, 2022) en tant que priorité absolue, une approche globale de la préparation à la sécheresse et de la résilience dans toutes les régions de l'Afrique. Au cours du siècle dernier, de graves sécheresses ont tué plus de 10 millions de personnes et causé des pertes économiques de centaines de milliards de dollars dans le monde (Guha-Sapir et al, 2021). Une grave sécheresse frappe l'Afrique plus que tout autre continent. Plus de 300 sécheresses ont été enregistrées au cours des 100 dernières années, représentant 44 % de toutes les sécheresses dans le monde. Plus récemment, l'Afrique subsaharienne a subi les effets dramatiques de catastrophes climatiques de plus en plus fréquentes et violentes, (Taylor et al, 2017 ; Guha-Sapir et al, 2021).

Parmi les conséquences de la sécheresse sur l'hydrologie et le transport solide, plus de 1,4 milliard de personnes ont été touchées par la sécheresse entre 2000 et 2019. Cela fait de la sécheresse la deuxième plus grande catastrophe affectant la population après les inondations. L'Afrique connaît plus de sécheresses que tout autre continent, avec 134 sécheresses, dont 70 en Afrique de l'Est, (Wallemacq et al, 2015) ; les femmes (72 %) et les filles (9 %) supportent le fardeau disproportionné de la corvée

d'eau, en particulier dans les régions arides, dépensant jusqu'à 40 % de leur apport calorique pour le transport de l'eau, (UNDRR, 2021) ; la sécheresse est un facteur majeur de variabilité du rendement des cultures. En particulier, cela peut entraîner de faibles rendements et des pertes économiques potentiellement importantes ; la proportion de cultures touchées par la sécheresse a plus que doublé au cours des 40 dernières années. La perte de sol s'élève à 12 millions ha/an à cause de la sécheresse et de la désertification, (FAO, 2017) ; les écosystèmes se transforment progressivement en sources de carbone, notamment lors des sécheresses extrêmes qui sont importantes sur 5 des 6 continents, (Stocker et al, 2019) ; l'absorption de carbone par les écosystèmes terrestres représente un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone, mais leur capacité à séquestrer le carbone est très sensible à la sécheresse, (Chen et al, 2020) ; les augmentations rapides de la température de surface sont corrélées à une diminution de la biodiversité, y compris des taux d'extinction accrus, (Peace, 2020 ; Nath et al, 2021).

I- 8- Dégradation des sols et érosivité aux pays de Maghreb central

Pendant des siècles, les géographes ont considéré la région du bassin méditerranéen comme très sensible à toutes les formes d'érosion. En fait, les civilisations successives ont évolué à travers le développement des ports de commerce, le défrichement des forêts pour construire des flottes et des villes, la destruction de la végétation par les incendies et le pâturage de masse. Entre 1945 et 1970, les promoteurs ont surveillé l'étendue des dommages causés par l'érosion, perte de productivité des sols, ravinements, glissements de terrain, envasement des barrages, inondations. Des techniques de lutte mécanique (bancs, traverses) et des techniques de lutte biologique (interdictions, plantations avant barrage) ont été utilisées, bien que peu d'études aient été menées. Des géographes (Avenard) localisent les signatures des processus d'érosion et en déduit les distributions futures des risques.

Une étude publiée dans Scientific Reports a développé une base de données mondiale sur l'érosion des précipitations et une carte mondiale de l'érosion, en Afrique centrale et l'Afrique occidentale, où les indices d'érosivité annuelle moyens sont supérieurs à 5 000 MJ,mm/ha,h,an, (Morsli et al, 2012). En Afrique, le type et le degré d'érosion dépendent de la morphologie topographique. Dans les basses montagnes méditerranéennes, souvent convexes et concaves, l'érosion en ravines domine largement l'érosion des sols, en particulier l'érosion en nappe, (tableau I-7).

Tableau I-7 Importance de divers processus d'érosion (t/ha/an) en fonction de trois paysages typiques de l'Afrique (Roose et al, 2000).

Paysages	Pente (%)	Erosion en	Erosion	
		nappe	aratoire	Ravinement
Basses montagnes méditerranéennes	10-40	0,1-20	10-50	90-300
Longs glacis soudano-sahéliens	1-3	0,1-35	2-5	20-100
Collines convexes tropicales humides	4-30	0,1-700	5-50	100-500

Aux pays du Maghreb central, plusieurs chercheurs consacrent une partie ou la totalité de leurs travaux à l'étude de l'érosion hydrique : ([Morsli et al,2013](#) ; [Ben rhouma et al,2018](#) ; [Aserar,2019](#) ; [Ennassiri et Mouak, 2021](#) ; [Khemiri et Jebari, 2021](#) ; [Sebbar et al,2022](#) ; [Elahcene et al,2022](#) ;[Aissaoui et Ben ghazi,2023](#)).

Selon [Hajji et al \(2019\)](#), l'érosion hydrique a été évaluée dans un contexte semi-aride méditerranéen (comme le bassin versant d'El Gouazine en Tunisie). Cette étude vise à établir et mettre en œuvre une méthodologie pour quantifier la dégradation des sols par les écoulements des eaux et à obtenir la cartographie des pertes des terres on utilise le SIG dans le bassin versant d'El Gouazine, dans le but de planifier de manière adéquate les actions d'aménagement à entreprendre et de protéger en priorité les zones à risque élevé de l'érosion. Le principe de l'application de l'approche USLE, MUSLE, RUSLE, FAO/SIG consiste à combiner les principaux facteurs de l'érosion adaptés aux conditions tunisiennes, en se basant sur la combinaison de ces facteurs liés au milieu naturel et aménagé. Afin d'atteindre cet objectif, la superposition des couches sur les précipitations, les sols, la topographie, le couvert végétal et les aménagements permet d'obtenir des cartes synthétiques de répartition du taux d'érosion en tonnes par hectare par an. En se basant sur ces résultats, on peut conclure que le lac collinaire présente une faible érosion avec un taux d'envasement d'environ 1,8 tonnes par hectare par an. La mise en place de mesures de préservation des eaux et des sols a conduit à une diminution significative de la perte de terre forte et moyenne d'environ 50% dans le bassin El Gouazine, démontrant ainsi l'efficacité des aménagements antiérosives depuis leur mise en place en 1996. Finalement, une étude comparative des quatre méthodes démontre que les méthodes RUSLE et USLE sont valides dans le bassin versant à la différence de la méthode MUSLE et de la FAO. En outre, les résultats obtenus démontrent que le modèle RUSLE, qui est adapté aux conditions des bassins versants, permet d'obtenir les résultats d'estimation les plus performants.

Dans leur étude de [2023, Aissaoui et Ben Ghazi](#) ont mesuré l'érosion de la nappe dans la moyenne vallée de l'Oued Sarrath (Haut-Tell, Tunisie). Sa cartographie repose sur l'application de la version révisée du modèle empirique de Wischmeier et Smith 1978 (USLE). Afin de calculer les pertes en terres et de créer une carte de sensibilité à cette érosion, le modèle a dû combiner des variables telles que les précipitations, la structure et la texture des sols, la pente, le couvert végétal et les techniques antiérosives. Les conclusions obtenues indiquent que la dégradation moyenne des sols, causée par l'érosion hydrique en nappe dans le bassin versant de l'Oued Sarrath, s'élève à environ 23,72 tonnes par hectare par an, une concentration supérieure aux niveaux tolérés dans des conditions similaires. De plus, les pertes de sol sont inégalement réparties. Dans les bas-fonds, elles sont extrêmement faibles et atteignent 458,945 tonnes par hectare par an dans les reliefs pentus, qui ne disposent pas de mesures de protection antiérosive.

En Tunisie centre-ouest, [Ben Jalleb et al \(2024\)](#) ont examiné les conséquences de l'érosion hydrique sur les sites archéologiques, en se concentrant sur les occupations archéologiques de l'Oued Bou Hayya. L'objectif de cette étude est d'analyser l'érosion des sites archéologiques repérés aux abords de l'Oued Bou Hayya. L'approche utilisée repose principalement sur une exploration pédestre effectuée tout au long de l'Oued Bou Hayya. La réalisation de cette étude est essentielle pour reconnaître ces

sites et élaborer des solutions de sauvegarde, en particulier pour les stations archéologiques qui sont particulièrement exposées à la dégradation. Elle vise également à sensibiliser le monde scientifique et les responsables administratifs à l'état actuel de ces sites et à l'impact destructif à long terme de l'érosion sur le patrimoine archéologique.

En Algérie, le bassin versant de la Tafna et le bassin versant d'Oued El Hammam ont été étudiés par [Morsli et al \(2013\)](#). Ils ont examiné les critères morphologiques et analytiques, ainsi que le comportement hydrodynamique des sols sur des transects représentatifs de substrats marneux et gréseux, le long desquels se succèdent plusieurs occupations. Les résultats indiquent que la dynamique érosive est responsable des variations des caractéristiques du sol. Cette dynamique est principalement influencée par l'occupation du sol, les caractéristiques du couvert du sol, l'activité humaine et les aménagements. De 1993 à 2004, le coefficient de ruissellement maximal a dépassé 30 % sur un terrain à végétation très faible et 60 % lors des averses exceptionnelles. Dans les terres abandonnées, la dégradation de sol oscille entre 1,5 et 6,8 tonnes par hectare par an, tandis que l'érosion globale (érosion en nappe et linéaire (ravinement)) varie de manière encore plus importante et peut atteindre des taux records (54 t.ha⁻¹.an⁻¹). Les éléments clés de l'érosion sont ceux qui concernent les sols et les conditions de surface : les propriétés du sol, les surfaces fermées et ouvertes, la rugosité et la couverture du sol ainsi que les mesures concernant la pluviométrie (intensité, hauteur et fréquence). L'impact de la pente est important et peut être réduit par une bonne utilisation des versants.

La cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant Oued Fergoug dans les monts des Béni-chougranes en Algérie a été étudiée par [Souidi et al \(2017\)](#). L'objectif de cette étude est de mettre en évidence la nature et l'importance des facteurs et paramètres qui contribuent à la détérioration du sol (climat semi-aride, pluies irrégulières, sol friable, couverture végétale insuffisante) et, par conséquent, le risque engendré dans les régions méridionales. L'étude a pour but de mettre au point une méthodologie basée sur le modèle USLE (Equation Universal Soil Loss), la télédétection et les SIG afin de quantifier les régions vulnérables aux dégradations des sols dans les régions de montagne (Monts de Bénichougrane, Atlas Tellien, Algérie) et afin de créer une carte de risque qui peut servir de document de référence pour les responsables. La méthode utilisée implique d'inclure, dans un système d'information géographique (SIG), trois éléments qui favorisent l'érosion : la pente, la porosité des matériaux et l'occupation des sols. Quatre zones de vulnérabilité à l'érosion hydrique ont été identifiées grâce à la carte de risque d'érosion : faible, moyen, fort et très fort, Les crêtes et la zone montagneuse en amont du barrage Fergoug sont principalement à risque d'érosion forte et très forte, comme le confirment les observations terrain. Cette méthodologie peut être appliquée à toutes les régions de moyenne montagne et elle permettra de définir les zones prioritaires d'intervention afin de réduire le risque d'érosion hydrique et d'envasement des barrages en aval.

La recherche [Arabi \(2021\)](#) vise à examiner la lutte contre l'érosion en Algérie, allant de la protection et de la restauration des sols (DRS) à la gestion durable de l'eau. Les résultats obtenus au cours des 40 dernières années n'ont pas répondu aux attentes de la société. Il est essentiel de favoriser une croissance agricole durable dans les systèmes de production en utilisant de manière adéquate les eaux,

le couvert végétal et les sols, tout en préservant l'environnement au maximum. Les premières tentatives ont été fructueuses.

Au Maroc, l'équipe de [Heusch \(1986\)](#) a constaté que : l'érosion foliaire est moins importante que l'érosion par le ruissellement et l'érosion fluviale ; la pente est moins importante que la localisation topographique ; des averses de saturation extraordinaires se produisent dans les parcelles et les bassins ont un rôle très important sur le transport solide.

Les pertes en sol dans le bassin versant d'Oum Er-Rbia dans le sud-ouest du Moyen Atlas du Maroc ont été évaluées par [Yjjou et al, \(2014\)](#) en utilisant les Systèmes d'Information Géographique. Grâce à l'analyse, la carte d'érosion a été déduite, ce qui suggère que le phénomène d'érosion affecte l'ensemble du bassin versant d'Oum Er-Rbia, mais à des niveaux variés. Par conséquent, le taux moyen de pertes en sol est de 224 tonnes par hectare par an, avec 45 % de la superficie du bassin versant exposée à une érosion de 50 à 400 tonnes par hectare par an, principalement dans les zones à forte pente, à forte érodibilité et à faible couvert végétal.

Le sous-bassin versant d'Agoudal est une étude menée par [Oujane et al \(2021\)](#), qui couvre la partie amont de la vallée d'Imilchil, située dans la province de Midelt et la région de DraaTafilalet au Sud-Est du Maroc. La recherche vise principalement à évaluer la sensibilité de la zone d'étude à l'érosion hydrique et à dresser une cartographie des zones vulnérables prioritaires pour d'éventuelles mesures d'atténuation. Les résultats obtenus indiquent que presque tout ce bassin est exposé à une dégradation des sols intense ; en effet, près de 66% de la superficie de la zone d'étude est affectée par les classes de dégradation spécifiques de 50 à 400 tonnes par hectare par an, tandis que 18,9 % présentent des taux faibles à moyens allant de 7,4 % et 32,17 t/ha par an. Seulement 1,4 % du sous bassin versant présente des taux de dégradation spécifique inférieurs à 7,4 tonnes par hectare par an. Le taux d'érosion moyen est de 255 tonnes par hectare par an, avec un écart typique de près de 285 tonnes par hectare par an, en raison de la diversité des caractéristiques du milieu et de ses conditions.

I- 9- Apports sédimentaires des oueds aux pays de Maghreb central

Toutes les études sur 50 ans s'accordent sur la sensibilité de la région du Maghreb central à l'érosion hydrique, mais utilisent des valeurs moyennes différentes, car les différentes méthodes et modèles utilisés donnent souvent des résultats différents : ([Bouguerra et al,2016](#) ;[Tadrist et al,2016](#) ;[Hallouz et al,2020](#) ; [Ennassiri et Mouak,2021](#) ; [Mehdouani,2022](#)).

À l'exception de l'Algérie, aucun des pays du Maghreb central n'a mesuré en continu l'apport de sédiments terrestres à la mer Méditerranée. A cet égard, plusieurs études ([Ghenim et Megnounif, 2013](#) ; [Morsli et al, 2013](#) ; [Hallouz et al, 2017](#)) montrent que la baisse des précipitations depuis 1980 a été prédominante. Liés à l'influence anthropique de ce sol a dégradé la couverture végétale et accru la sensibilité du sol à l'érosion et au ruissellement. En conséquence, la quantité de sédiments détachés du fond et transportés vers le réseau fluvial a considérablement augmenté. Contrairement aux tendances des flux liquides et solides sous le niveau du compartiment et du bassin versant, les rejets

d'eau et de sédiments vers la mer montrent un autre signe caractérisé par une diminution progressive depuis 1980.

En utilisant des données sur les flux de sédiments en suspension de 69 rivières d'une superficie supérieure à 200 km², *Poulos et Collins (2002)* ont rapporté que les flux de sédiments fluviaux dans diverses régions géographiques du bassin méditerranéen étaient de 650 millions t/an. Le flux total vers la zone maghrébine est estimé à 88,2 millions t/an. En outre, 3 500 barrages (grands et petits) dans la région ont réduit le ruissellement des sédiments dans la mer de 56 %, et les barrages de la région du Maghreb l'ont réduit jusqu'à 70 %.

A titre de comparaison, le flux global moyen de sédiments exportés vers l'océan est estimé à 16 gigatonnes par an, avec un flux spécifique de 150 t/km².an (*Ludwig et Probst, 1998*). Les rejets d'eau dans la mer témoignent de l'importante érosion du bassin méditerranéen, en particulier des pays du Maghreb central. De plus, les apports en sédiments dans le bassin méditerranéen ont considérablement changé au cours des dernières décennies. Certains pensent que cela est principalement dû à l'activité humaine (Woodward, 1995), tandis que d'autres l'associent à l'évolution du climat vers des conditions plus sèches, (*Ludwig et al, 2009*).

Sadaoui et al, (2018) ont utilisé une approche empirique et ont constaté que le débit naturel des matières en suspension dans tous les fleuves méditerranéens est d'environ 997 millions t/an, ce qui correspond à un débit spécifique de 211 t/Km².an. De plus, ils estiment la contribution des fleuves de la région du Maghreb à 96 millions t/an, soit un débit spécifique de 351 t/km².an. Ils estiment que la rétention des sédiments fluviaux par les barrages représente 35 % du ruissellement total.

Hadour et al, (2020) dans ces études portant sur les influences climatiques et anthropiques sur la réduction des apports sédimentaires sur le versant méditerranéen du plus grand oued du Maghreb (Cheliff), ont constaté que les flux spécifiques de sédiments en suspension exportés vers la mer sont de 487 t/km².an. De plus, des tests statistiques de rupture montrent une diminution de 26% des précipitations et une diminution de 74% à 63% des apports liquides et solides à l'océan sur la période 1981-2010. L'analyse de corrélation pour la même période montre une diminution de 77,9 % et 77,8 % des contributions des précipitations solides et liquides au ruissellement par rapport à la période 1968-1980. Cependant, la méthode du double cumul indique que des facteurs autres que les précipitations contribuent également à la réduction de l'apport de sédiments dans la mer. Il s'agit pour la plupart de grands barrages, qui captent environ 71 % du total des sédiments exportés vers la mer entre 1968 et 2010.

I- 10 - La typologie des oueds du Maghreb central

La taille des bassins versants et la pente moyenne, ces deux paramètres principaux sont utilisés pour regrouper les oueds du Maghreb central en 3 types, (figure I-17). La classification utilisée pour qualifier ces oueds en fonction de leur pente moyenne (tableau I-8) est celle de (*Bernard, 1925 ; In Koulinski, 1993*) modifiée.

Tableau I-8 Classification des oueds en fonction des pentes moyennes.

Les pentes	Les classifications
Les pentes < 1,5 %	Rivières
1,5 % < les pentes < 6 %	Rivières torrentielles
6 % < les pentes < 8 %	Torrents
Les pentes > 8 %,	Torrentiel en milieu très pentu

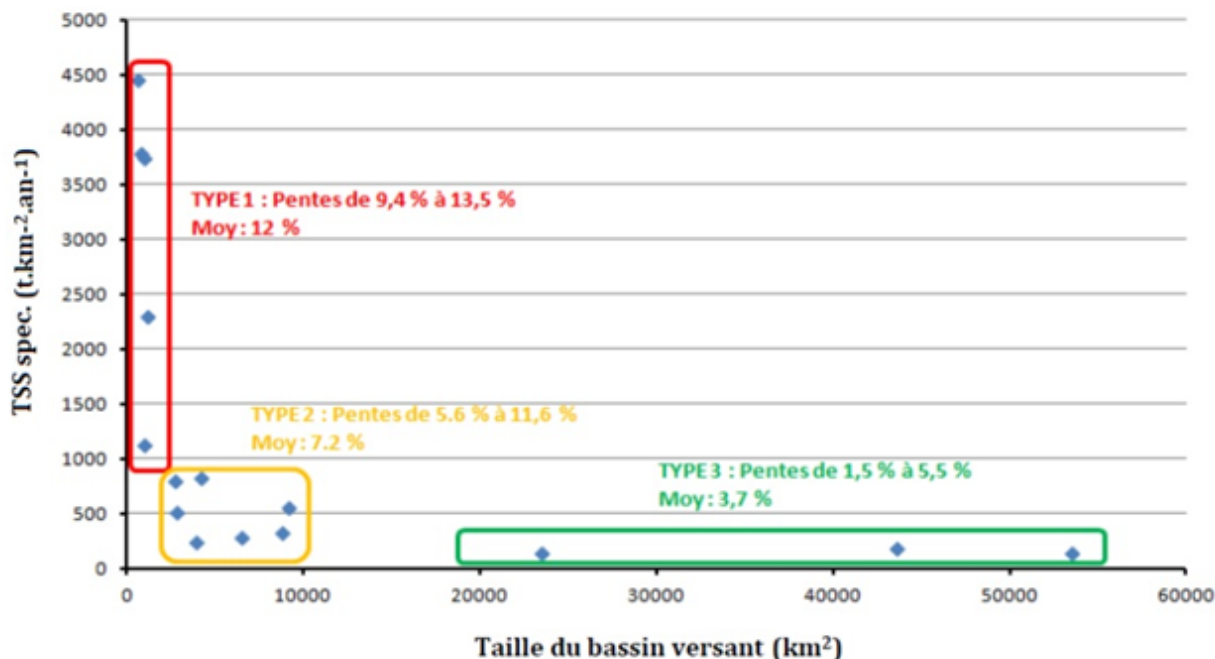


Figure I-17 Typologie des oueds selon leurs transport solide spécifique, la taille de leurs BV et leur pente moyenne, Type 1 : Agrioun, Rhis, Laou, Martil et Nekor, Type 2 : Isser, Kert, Soummam, Bou Alalah, El Kebir, Seybouse et Sebaou, Type 3 : Cheliff, Medjerda, Moulouya (Quinquis, 2017).

- **Type 1 : TSS spécifique élevé, petite superficie de bassin versant et très fortes pentes (moyenne des pentes 12 %)**

Oued Agrioun a la productivité sédimentaire spécifique la plus élevée vers la côte méditerranéenne à 4473 t.km⁻².an⁻¹. Viennent ensuite les oueds Rhis, Laou et Martil, dont le TSS spécifique est de 2300-3800 t.km⁻².an⁻¹. Les bassins des oueds Agrioun, Rhiss, Laou, Martil et Nekor ont les caractéristiques suivantes :

1. Un TSS de très haute spécificité ;
 2. Du fait de leur pente moyenne, ces oueds sont du type « rapides moyens » ;
 3. C'est une pente très raid.
- **Type 2 : TSS spécifique moyen à faible, superficie de bassin versant moyenne et fortes pentes (moyenne des pentes 7,2 %)**

Les oueds Isser, Kert, Soummam, Bou Alalah, El Kebir, Seybouse et Sebaou, la production sédimentaire spécifique faible à modérée entre 249 et 830 t.km².an⁻¹. Les Oueds ont les caractéristiques suivantes :

1. Les superficies des bassins versants sont moyennes et les pentes ne sont pas très prononcées ;
2. La végétation est également modérée à faible ;
3. En raison de la pente moyenne, ces oueds sont de type « rugueux ».

- **Type 3 : TSS spécifique faible, grande superficie de bassin versant et pentes assez peu prononcées (moyenne des pentes 3,7 %)**

Le dernier groupe comprend les trois plus grands oueds : Cheliff, Medjerda et Moulouya, ont tous un TSS spécifique faible pour les pays du Maghreb (142 à 184 t.km².an⁻¹) et un bassin versant beaucoup plus important que les pays du Maghreb. En raison de la pente moyenne, ces oueds sont du type « fleuve torrent ».

Par conséquent, les grands bassins versants favorisent des TSS plus élevés. L'accumulation de TSS à t.an⁻¹ dans un oued avec un petit bassin versant donne :

1. Ils soulignent que la contribution des sédiments à l'océan n'est en aucun cas négligeable ;
2. Réelle somme des TSS pour 5 oueds de type 1 (Agrioun, Rhis, Laou, Martil et Necor) représente 13,91 10⁶.t.an⁻¹, soit 1,7 fois la TSS d'Oued Cheliff ;
3. De cette observation se vérifie lorsque l'on compare les TSS cumulées de sept oueds de ce type,2 (Isser, Kert, Soummam, Bou Alalah, El Kebir, Seybouse et Sebaou), le TSS global trouvé de 17,67 10⁶.t.an⁻¹ représentant 2,2 fois le TSS de l'oued Cheliff ; ([Quinquis, 2017](#)).

I- 11 - L'envasement spécifique des barrages du Maghreb central

Plusieurs recherches ([DGBTH ,2021 ;ANBT,2021 ; Ouamane et al,2021 ; El-ommal et Tribak ,2023 ; Kassou et al,2023 ;ONAGRI,2024](#)) ont entamé le problème posé par la sédimentation dans le barrage du Maghreb central qui doit être étudié de l'amont à l'aval du barrage. Les effets de ce phénomène sont très alarmants. Elle affecte au niveau du réservoir lui-même, ainsi qu'au-dessus et au-dessous du barrage. Les mécanismes de sédimentation, notamment les courants de densité, restent les étapes les plus délicates de ce processus, et leur contrôle conduit directement à proposer des méthodes de contrôle appropriées. Le Maghreb central compte 234 barrages d'une capacité totale de stockage de 22,7 milliards m³, répartis comme suit (figures I-18 et I-19). En surveillant l'envasement du réservoir, on peut déterminer que la perte de capacité due à l'envasement est en moyenne d'environ 127 millions m³/an. Cette capacité se répartit entre les trois pays (figure I-20). En conséquence, d'une part, les crues automnales violentes et brutales provoquent une forte érosion, et d'autre part, le taux d'érosion du bassin est important, ce qui entraîne l'apparition de courants de densité dans les réservoirs et les barrages dans les pays de Maghreb central.

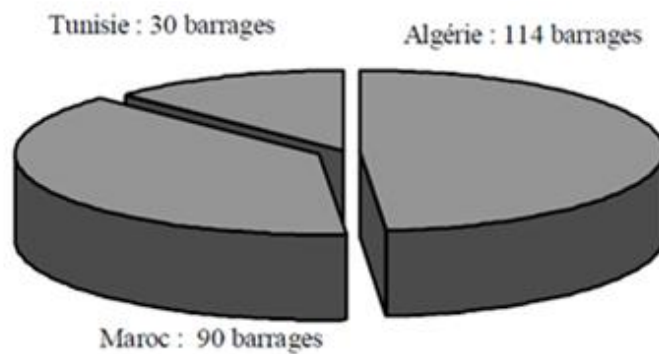


Figure I-18 Nombre de barrages au Maghreb central (Remini et Remini, 2003)

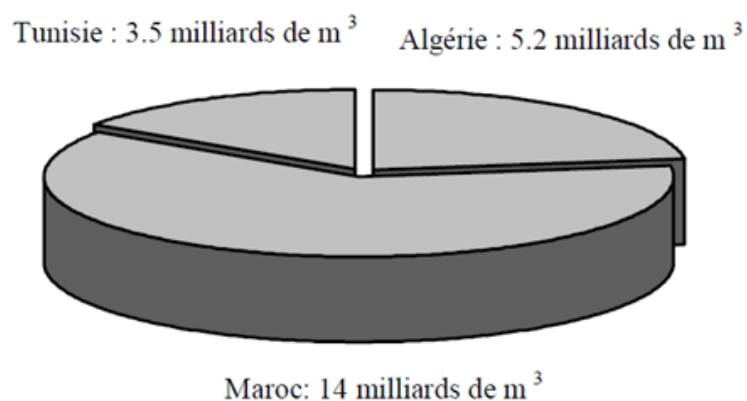


Figure I-19 Capacité totale de stockage au Maghreb central (Remini et Remini, 2003)

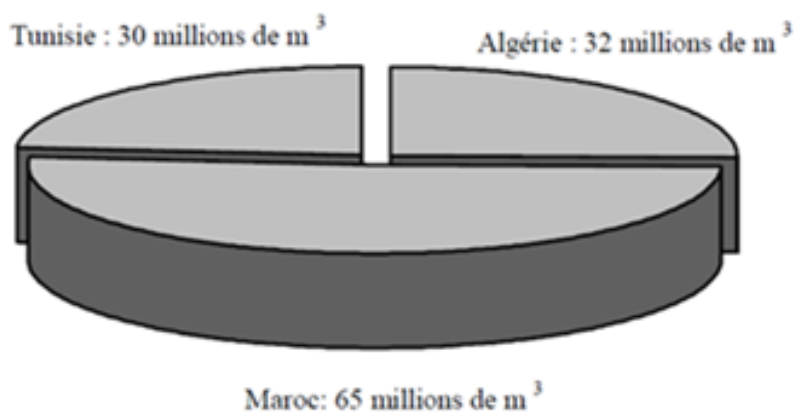


Figure I-20 Envasement annuel au Maghreb central (Remini et Remini, 2003)

Les sédiments dans les barrages causent des problèmes majeurs non seulement au niveau du réservoir lui-même, mais aussi au-dessus et au-dessous du réservoir, entraînant une réduction de la capacité utilisable du barrage, tuyau de vidange bouché, la sédimentation peut compromettre la stabilité

structurale. Il a également le potentiel de favoriser l'eutrophisation des lacs. Les sédiments en suspension des eaux évacuées du barrage par le canal se déposent sur ces ouvrages, réduisant le débit et les rendant difficiles à utiliser (figure I-21) (Demmak, 1982 ; Remini, 1997).

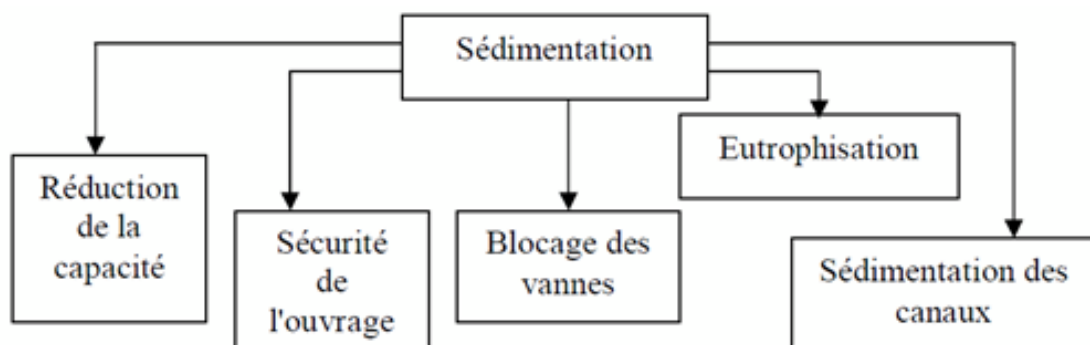


Figure I-21 Problèmes posés par la sédimentation (Remini, 1997).

Dans les pays de Maghreb central comme la Tunisie, l'Algérie et le Maroc, 127 millions de mètres cubes de boues sont déposés chaque année dans des réservoirs. Le tableau I-9 montre les taux de dépôt pour les 10 barrages les plus limoneux de Maghreb central.

Tableau I-9 Taux d'envasement des barrages de Maghreb central 2002 (Demmak, 1982 ; Remini, 1997).

Barrages	Année de mise en service	Capacité 10 ⁶ m ³	Envasement moyenne annuelle 10 ⁶ m ³ /an	Taux de sédimentation (%)
Mohamed V (Maroc)	1967	725	11,6	56
Mansour Edahabi (Maroc)	1972	592	4,8	24
El massira (Maroc)	1979	2724	9	7,5
Bir El Ouidane (Maroc)	1953	1484	4,5	15
Mellegue (Tunisie)	1954	332	5,94	85
Sidi Salem (Tunisie)	1981	555	5,6	21
Ghrib (Algérie)	1939	280	3,2	72
Oued El Fodda (Algérie)	1932	228	2,31	71
Ighil Emda (Algérie)	1953	155	1,33	42
Boughezoul (Algérie)	1934	55	0,66	81

I- 12 – Le cas d’Algérie

Le climat de l’Algérie est très variable selon les régions (nord-sud, est-ouest). Toute la bordure nord, y compris la côte et l’atlas tellien (chaud et sec en été et frais et humide en hiver), est de type méditerranéen, le haut plateau est semi-aride et désertique au-delà de l’Atlas saharien, (Khezazna,2017 ; Oubadi et al,2020,2021). La station météorologique de l’aéroport de Ouargla a signalé les températures les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1949 jusqu’en janvier 2023, En juillet 2018, une température record de 51,3°C y a été enregistrée. L’été le plus chaud est de juillet à septembre, enregistré en 1966 par l’ensemble des 80 stations météorologiques en dessous de 1 360 mètres d’altitude en Algérie, avec une température moyenne de 29,9 °C. Cette température moyenne est généralement mesurée toutes les 4 à 6 heures, elle inclut donc la nuit, cette valeur est généralement d’environ 28,0 degrés Celsius. Le jour le plus froid de 1949 à 2023 a été enregistré à la station météorologique de Mecheria. En janvier 2005, la température a chuté à -13,8°C, Mecheria est située à une altitude de 1150 mètres d’altitude. L’hiver le plus froid (janvier à mars) a été avec une température moyenne de seulement 9,5°C. La température normale de l’Algérie est d’environ 2,3 degrés plus chaude, avec des températures de 11,8 degrés au cours des trois derniers mois, (ONM, 2023). De 1991 à 2022, seules sept stations météorologiques du pays ont signalé des relevés de température continus. À partir de ces prévisions météorologiques, nous avons identifié des tendances à long terme qui décrivent les températures mensuelles moyennes. Août 1999 a été le mois le plus chaud de toute la période, avec une température de 31,4°C. Janvier 2005 a été le mois le plus froid avec une température moyenne de 8,9°C. La température annuelle moyenne est d’environ 19,8 °C depuis 1991 et d’environ 20,9 °C jusqu’en 2022, (figure I-22), (ONM, 2023). La zone d’Oranie a enregistré une augmentation de la température de plus de 1,5 °C entre 1926 et 2006, et une diminution moyenne des précipitations de 10 à 20 %, (Tabet-aoul, 2008).



Figure I-22 Evolution à long terme des températures de 1991 à 2022 (ONM, 2023).

Les précipitations les plus importantes ont été enregistrées en novembre 1988. La station météo de Guelma a enregistré 15,9 mm par jour, le plus élevé de 1949 jusqu’à 2023. La zone avec le plus de précipitations au cours de l’année est la station météorologique du port de Jijel. La zone la plus sèche se situe près de l’aéroport d’Ain Salah, (ONM, 2023). Une étude sur le changement climatique dans la région d’Oranie ont révélé une augmentation de la sécheresse entre 1913 et 1938 et entre 1987 et 2012, avec un bioclimat qui montre une baisse vers la zone semi-aride inférieure suivie d’une période de sécheresse s’étalant sur 7 mois, (Yahiaoui, 2015). Les régions du nord-ouest et du sud-ouest de

l'Algérie seront les plus durement touchées, en raison à la fois d'un réchauffement important et d'une réduction des précipitations (ANRH). Dans le nord-ouest algérien, certaines études suggèrent que la quasi-totalité des stations et postes recensés ont pris fin dans les années 1970 (Meddi et Hubert, 2014), les précipitations diminuent, la variabilité interannuelle des précipitations augmente et les conditions sèches reviennent à la normale.

Les précipitations en Algérie ont chuté de 30 % au cours des deux dernières décennies. Lorsque les études ont été menées, nous étions dans une situation de sécheresse depuis près de 20 ans. Dans l'ouest, les précipitations ont diminué de 25 à 30%. D'ici 2022 et 2023, elles seront d'environ 40%. Au centre, c'est un peu plus bas dans le nord à 30%, et un peu plus bas à l'est. Globalement, les précipitations en Algérie ont diminué de 30 % au cours des 20 dernières années. Il baissera encore plus en 2022 et 2023, (figure I-23) (ONM,2023).

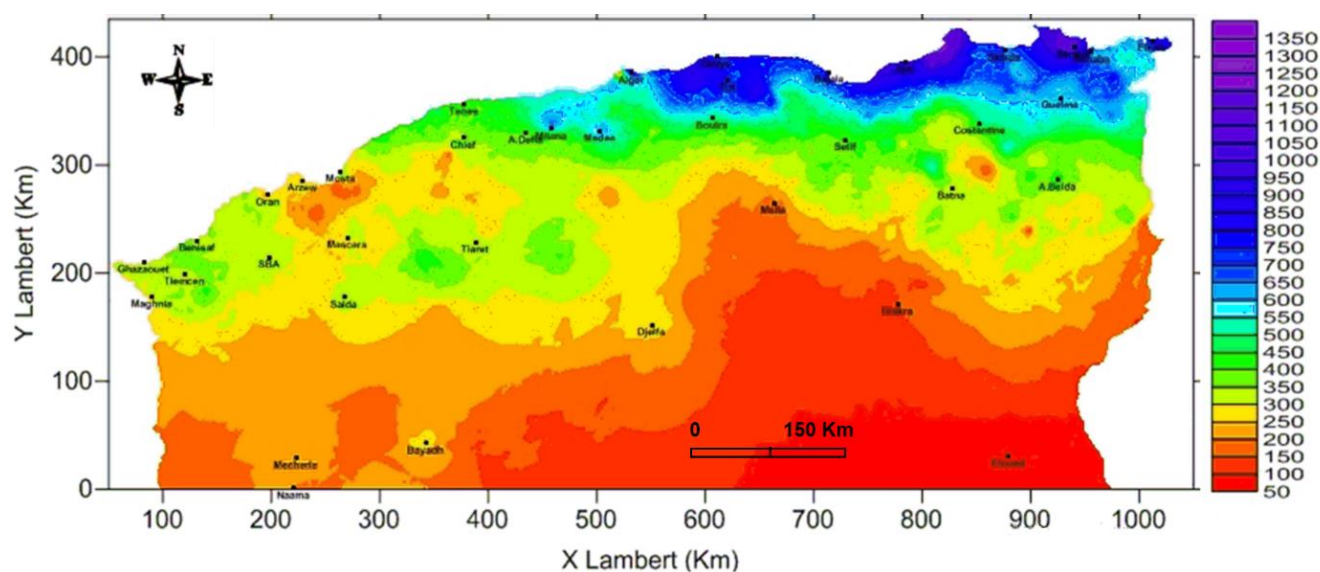


Figure I-23 Carte pluviométrique annuelle (mm) de l'Algérie de Nord (1990-2023) (ONM, 2023).

Bien que le nord de l'Algérie ait fait l'objet d'études sur les précipitations et la sécheresse, la majeure partie des études a été consacrée à la région du nord-ouest. Cette tendance a été confirmée par de nombreuses études scientifiques (Zeroual et al, 2017,2019 ; Benzater et al,2020 ; Bouklikha et al,2020). Khaldi, (2005) a étudié les impacts de la sécheresse sur les régimes d'écoulement dans l'ouest de l'Algérie. Ghenim et Megnounif, (2013), ont rapporté l'étendue de la sécheresse dans le nord-ouest de l'Algérie. Zeroual et al (2013) soulignent également que la diminution significative du ruissellement mensuel moyen dans le nord de l'Algérie est une conséquence directe de la diminution des précipitations. Taibi et al, (2013) qui ont identifié 6 régions dans cette région de nord de l'Algérie, dont deux dans l'est de l'Algérie où aucune diminution des précipitations n'a été enregistrée. D'une manière générale, les changements de précipitations et de sécheresse sont bien connus dans la partie nord-ouest de l'Algérie et sont moins étudiés à la partie nord-est, citant à titre d'exemple les études de : (Boudiaf et al,2020 ; Boulmaiz et al,2022).

Selon les experts (OMM,2021 ; Achbah et al,2024), les deux dernières décennies (2000-2020) ont été caractérisées par une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, les vagues de froid et les chaleurs extrêmes. Selon les critères fixés par la banque mondiale (2021), l'Algérie est classée comme un pays pauvre en termes de ressources en eau. Les ressources en eau varient de 600 m³/habitant/an en 2006 à 500 m³/habitant/an en 2020, avec un seuil de déficit fixé par la Banque mondiale à 1000 m³/habitant/an.

L'érosion hydrique est très active dans les montagnes méditerranéennes subhumides du nord de l'Algérie. La perte partielle ou totale de sol entraîne une productivité réduite. Les stress anthropiques de très long terme (surpâturage, coupe, feu) sur le couvert végétal dégradent fortement les sols. Les processus d'érosion peuvent se propager plus rapidement là où la végétation est détruite, causant des dommages importants en aval. Le taux d'érosion hydrique en Algérie est représenté dans la figure I-24.

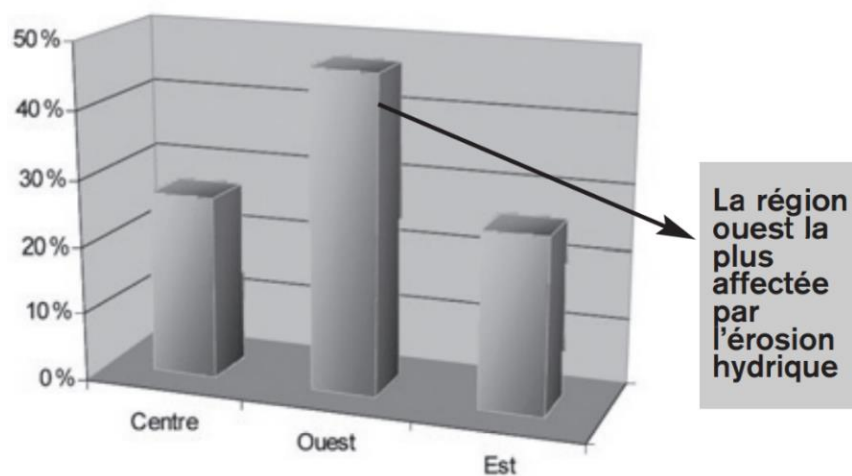


Figure I-24 Taux d'érosion hydrique en Algérie (Abdelkader et al,2011).

Morsli et al (2012) ont fourni des données qualitatives sur la fonction et le comportement du sol sur les pentes subhumides. A l'échelle de la topo séquence, les changements de sol le long des pentes sont dus à la dynamique de l'érosion. Les résultats indiquent que ce sont, entre autres, l'état du couvert végétal, la pente (transport et accumulation), le type d'usage et l'aménagement qui sont à l'origine de cette dynamique.

En Algérie, la zone à risque de désertification et d'érosion hydrique est estimée à 50 millions d'hectares (MADR,2010). Il occupe plus de 20% de la superficie totale du pays d'environ 238 millions d'hectares. Les zones menacées comprennent 14 millions d'hectares de zones montagneuses du nord (affectées par l'érosion hydrique) (Mostephaoui et al, 2013).

De nombreux auteurs ont étudié les effets des précipitations sur l'érosion des sols, cette relation a été souligné par de nombreux chercheurs, parmi eux : (Wischmeir ,1960 ,1978) aux États-Unis ; (Heush ,1970) dans les régions semi-arides et méditerranéennes ; (Roose ,1980) en Afrique de l'Ouest ; (Arabi,2021) en Algérie ; (Morsli et al,2013) dans le Nord-Ouest de l'Algérie ; (Balla ,2019) dans le Nord-Est d'Algérie. D'autre part plusieurs chercheurs ont étudié la relation entre transport sédimentaire et

facteurs géomorphologiques et climatiques dans des bassins algériens (*Benkhaled et Remini, 2003 ; Achite et Meddi, 2005*). Ainsi, (*Demmak, 1982 ; Meddi, 2015*) ont développé un modèle pour estimer la dégradation spécifique dans le nord de l'Algérie.

Enfin, d'autres investigations scientifiques ont été menées pour quantifier le transport de solides dans le nord de l'Algérie à titre d'exemple : (*Bouguerra et al, 2016 ; Guidoum, 2017 ; Kheniche, 2019 ; Hallouz et al, 2020 ; Ghernaout et al, 2020*). Les taux spécifiques d'érosion des sols dans le sud du bassin méditerranéen varient comme suit : 1000 t à 5000 t.km².an⁻¹ (*Waring, 1984*). Cependant, certains auteurs indiquent que ces valeurs peuvent être dépassées, on donne à titre d'exemple : Isser (Lakhdaria), 2300 t.km².an⁻¹ (*Bourouba, 1997*) ; Ebda, 1875 t.km².an⁻¹ (*Meddi, 1999*) ; Mouilah, 126 t.km².an⁻¹ (*Terfous et al, 2001*) ; La haute Tafna, 1120 t.km².an⁻¹ (*Megnounif et al, 2003*) ; Sebdu, 1330 t.km².an⁻¹ (*Ghenim et al, 2008*) ; Souagui II, 1268 t.km².an⁻¹ (*Keddar et al, 2011*) ; bassin du Kebir, 572 t.km².an⁻¹ (*Khanchoul et al, 2012*) ; bassin versant de l'Oued Bellah, 610 t.km².an⁻¹ (*Elahcene et al, 2013*) ; Sebdu, 343 t.km².an⁻¹ (*Megnounif et al, 2013*).

L'Algérie compte 114 barrages, mais malheureusement beaucoup d'entre eux ont des niveaux d'envasement élevés, ce qui réduit considérablement leur capacité réelle de stockage. Ce problème est particulièrement prononcé lorsqu'il s'agit de sécuriser l'eau potable nécessaire à la population. Plusieurs études scientifiques ont été menées sur le problème du limon dans les barrages algériens, (*Abdelkader et al, 2011 ; Tadrict et al, 2016 ; Benaicha, 2021*).

La figure I-25, tirée des statistiques sur les barrages algériens, montre qu'avant 1932 la capacité totale de stockage n'était que d'environ 34 millions de m³. Seulement en 1962, il y avait 200 millions de m³ de limon, qui ont atteint un milliard 200 mille de m³, une capacité nette d'un milliard de m³. Cependant, quelques années après l'indépendance, le rythme de construction des barrages s'est accéléré, culminant entre 1984 et 1988 (4,08 milliards de m³), (*Ouamane et al, 2021*).

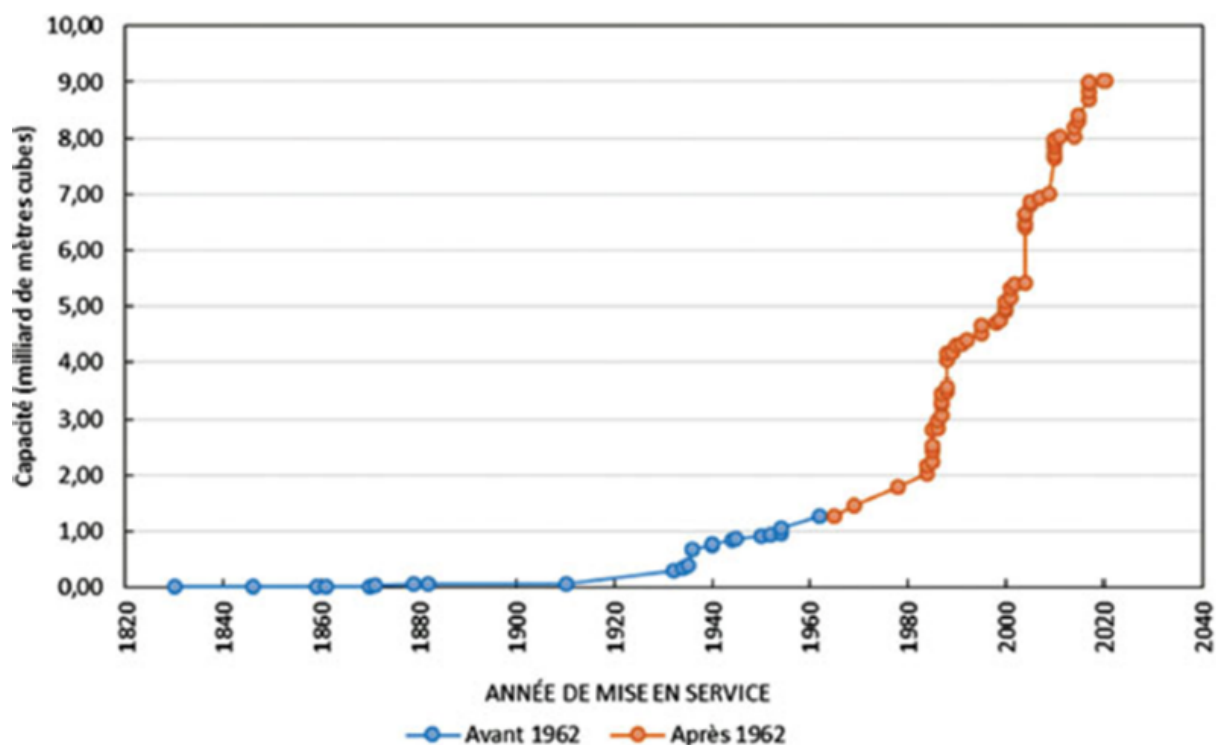


Figure I-25 Évolution du nombre de barrages Algériens et de la capacité de stockage pour période 1830-2019 (Ouamane et al,2021).

La figure I-26 montre que la capacité totale initiale est passée d'environ 9 milliards de m³ à 8,03 milliards de m³. Cette réduction de la capacité de stockage d'environ 1 milliard de m³ correspond à la perte de volume due aux dépôts de limon dans la retenue du barrage pendant sa durée d'exploitation. Cette perte correspond à un rapport de 11,2 % de la capacité initiale.

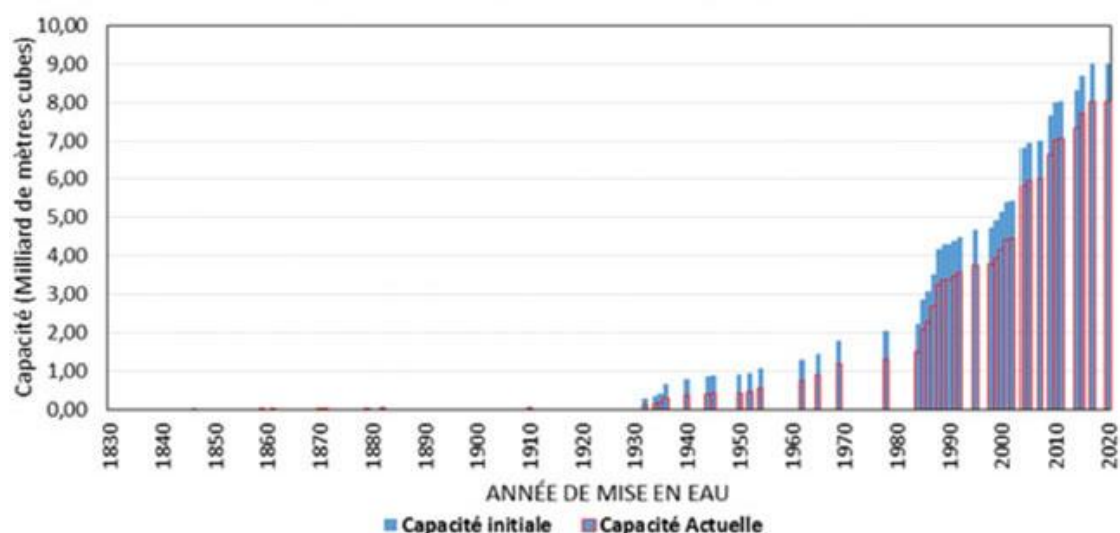


Figure I-26 Évolution de la capacité de stockage initiale et actuelle des barrages Algériens pour période 1930 - 2019 (Ouamane et al,2021).

L'agence nationale des barrages et transferts (ANBT,2021) a souligné que l'envasement des barrages est principalement dû au changement climatique, caractérisé par l'apparition de facteurs extrêmes tels que les températures élevées et les intempéries qui provoquent l'érosion des sols. Selon les prévisions de l'agence, ce volume de limon atteindra 1,4 milliard de m^3 en 2025, soit 18,05 % de la capacité totale du réservoir, à partir des seuls barrages existants. Sur la base des relevés bathymétriques entre 2005 et 2006 menés par l'agence nationale des barrages et des transferts (ANBT) sur 57 grands ouvrages algériens, l'envasement moyen s'élèverait à 45 millions de $m^3 \cdot an^{-1}$ (Remini et al., 2009), soit pour chaque barrage, un envasement moyen de 0,79 millions de $m^3 \cdot an^{-1}$, (figure I-27).

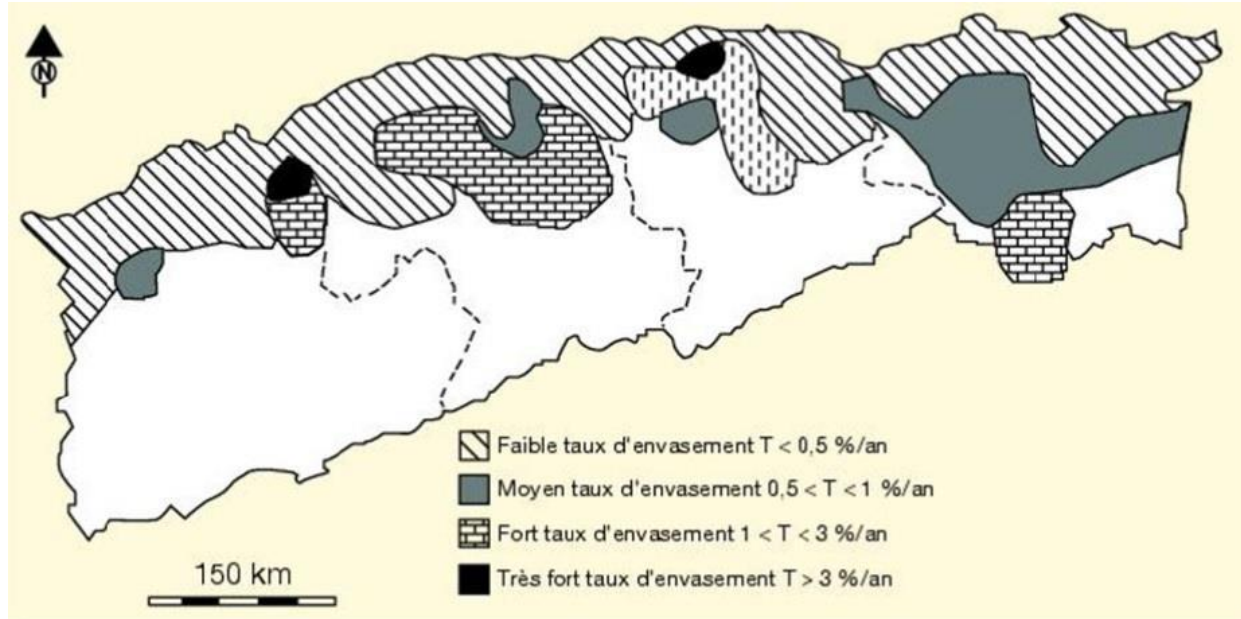


Figure I-27 Sensibilité à l'envasement des barrages en Algérie ; (Remini et al, 2009).

En Algérie, le dépôt des particules solides diffère considérablement d'une zone à l'autre. Ceci est dû aux disparités dans les éléments qui provoquent la dégradation de sol et le déplacement des sédiments (Benaïcha,2021). Le tableau I-10 présente l'état actuel de l'envasement de plusieurs barrages en Algérie.

Tableau I-10 Etat d'envasement de quelque barrage algérien (ANBT, 2021).

Barrage	Localisation	Année mise en service	Capacité initiale Hm ³	Capacité dernier levé Hm ³	Apport moyen annuel Hm ³ /an	Envaseme nt annuel Hm ³ /an
Oued Fodda	Chlef	1932	228	102,85	120	2,66
Ghrib	Ain Defla	1939	280	115,32	148,5	3,2
F-El-Gherza	Biskra	1950	47	14,89	21,3	0,8
Sarno	S. B. Abbes	1954	22	21,25	12	0,12
Ksob	Msila	1977	29,5	12,34	53	0,3
Zerdezas	Skikda	1974	31	18,68	53	0,4
Djorf-Torba	Bechar	1969	350	260,25	200	1,3
Fergoug	Mascara	1970	18	3,12	56	1,5
Beni-Amrane	Boumerdes	1988	16	11,85	414	4,1
Gargar	Relizane	1988	450	358,28	185	4,5
Cheurf AS II	Mascara	1992	82	70,21	57	0,36
Babar	Khenchla	1995	41	38,01	19,5	0,682
F-D-Gazelles	Biskra	2000	55,5	54,74	20,6	0,3
Taksebt	Tizi Ouzou	2001	175	181,02	196	0,265
Beni-Haroun	Mila	2003	960	997,9	780	6
Koudiat Medouar	Batna	2003	69,1	74,32	30	0,023

Au total, neuf barrages seront concernés par l'opération de dévasement des barrages. Celle-ci s'inscrit dans le cadre de la Quatrième campagne nationale de dévasement, prévue sur la période 2019-2024, consignée dans un rapport sur l'évolution de la bathymétrie et l'éligibilité des limons stockés dans les retenues du service de l'ANBT.

L'opération concerne les barrages de Fergoug et Bouhanifia (Mascara), Foug El Ghezala (wilaya de Biskra), Zardaza (Skikda), Djorf Torba (Béchar), Marjet Sidi Abed (Relizane), El Hamiz (Boumerdès), Qais (Khenchela) et le barrage Ghrib (Ain Defla). L'objectif initial d'élimination des boues est de 11 millions de mètres cubes des trois barrages concernés par le dévasement, sont le Barrage de Fergoug à Wilaya de Mascara, qui a pour mission d'enlever 2 millions m³ de limon de son lit, et le Ghrib (Wilaya, Ain Defla), qui dispose de 4 millions de m³ de vases, et enfin il y a 5 millions de m³ d'alluvions d'El Hamiz de la wilaya de Boumerdès.

Des mesures similaires sont prévues pour six autres barrages, y compris la suppression d'environ 33 millions de m³, a indiqué les services de l'ANBT.

Les barrages sont : Foug El Ghezala (wilaya de Biskra) 8 millions m³, Zardaza (Skikda) 5 millions m³, Djorf Torba (Béchar) 5 millions m³, Marjet Sidi Abed (Relizane) 5 millions m³, Qais (Khenchela) 5 millions m³ et enfin 5 millions m³ de Bouhanifia (wilaya de Mascara).

Un total de 44 millions m³ de boues seront extraites de ces opérations de dévasement, a ajouté les services de l'ANBT. Selon le rapport de (ANBT, 2021), la perte de volume due à l'envasement du barrage en 2020 est estimée à 1 279,26 millions m³ soit 16,4 % de la capacité totale de stockage initiale qui est d'environ 7 754, 83 Millions m³.

Conclusion

Le problème de l'érosion et du transport de sédiments constitue un enjeu crucial à l'échelle nationale et mondiale. Durant la dernière décennie, de multiples chercheurs ont consacré leurs efforts à l'étude du Maghreb central, menant de nombreuses recherches afin de comprendre et d'expliquer les mécanismes, les origines et les impacts. Le phénomène de l'érosion hydrique et du transport des solides est intrinsèquement lié à la complexité de la pluviométrie et de l'écoulement. La morphologie des cours d'eau est directement associée au déplacement des particules solides dans leur lit.

L'objectif du chapitre est d'élargir notre connaissance du phénomène des exportations de matières solides en suspension qui sont transportées par les cours d'eau dans les pays du Maghreb central. Dans la région du Maghreb central, le transport de sédiments a constamment démontré son importance par un remplissage accéléré des réservoirs de barrage, ce qui a grandement diminué leur capacité de rétention et par conséquent, leur longévité. Il est donc crucial d'estimer avec précision la vitesse de remplissage du réservoir pour pouvoir mettre en œuvre les actions économiques et sociales appropriées. Il est également primordial de développer des techniques de recherche pour améliorer les méthodes de contrôle du colmatage accéléré des barrages. Ce chapitre, basé sur des données scientifiques, offre une étude détaillée de l'hydrologie, du changement climatique, de la sécheresse, de l'érosion, du déplacement des sédiments et de la sédimentation.

Chapitre II

Caractéristiques morphométriques de la zone d'étude

Introduction

Il est possible d'observer l'impact de certains paramètres hydro morphométriques sur l'érosion et le transport solide en étudiant le milieu physique ou morphométrique. L'étude porte sur le bassin versant de l'Oued Lakhdar, qui possède toutes les caractéristiques naturelles propices à une érosion accrue.

L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière succincte les caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Lakhdar. Les facteurs physiques (taille, pente...), climatiques (intensité de pluie, température), biologiques (types de végétation), géologiques (lithologie), pédologiques (déforestation) seront simplement mentionnés de manière très succincte.

Le chapitre débute en présentant le bassin versant Tafna et le sous-bassin de l'Oued Isser, puis en présentant la zone d'étude, et enfin en examinant les caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

II- 1. Le bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna couvre la Wilaya de Tlemcen et Ain Témouchent (77% de la superficie totale) et déborde sur le royaume du Maroc (Figure II.1). Il est bordé par les DjBELS de Terara au Nord-Ouest et par les DjBELS de Tessala au Nord-Est. Dans le Sud-Est, il se distingue par des altitudes allant de 1576 m à 1843 m dans les DjBELS de Tlemcen, tandis que dans le Nord, on peut trouver des plateaux avec des altitudes allant de 200m à 500m. La superficie du bassin est de 7245 km². La source de l'oued Tafna, qui s'étend sur 170 km ([Bouanani et al ,2013](#)).

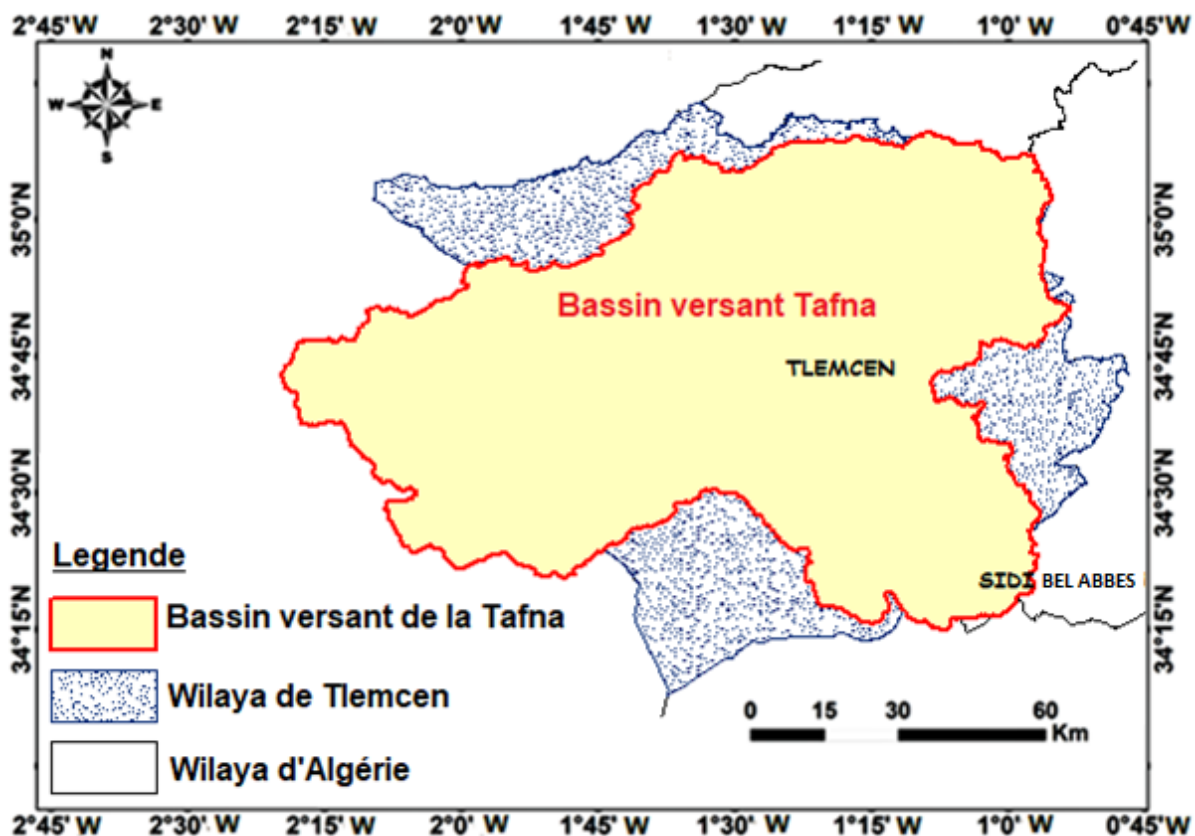


Figure II -1 Bassin versant de la Tafna.

Après le Chélif, la Tafna est le deuxième plus grand cours d'eau de l'Oranie, son écoulement est presque perenne, ce qui est remarquable dans nos régions sèches. Il alimente un bassin montagneux à relief composé des Monts des Traras et des Sébaa Chioukh (1 200 et 600 m) au nord, qui font partie du Tell septentrionale, et des Monts de Tlemcen (1 800 m) au sud, qui font partie du Tell méridional ou Tell atlasique. La Tafna se jette dans la mer Méditerranée, sur la rive sud de la mer d'Alboran, au niveau de Rachgoun, sur une côte escarpée et avec une plate-forme continentale épaisse (Bouguerra et al., 2016).

La principale particularité de son bassin réside dans son appartenance à deux domaines structuraux distincts : alpin ou tello-rifain dans les Traras orientaux et les Sébaa Chioukh ; atlasique ou « tlemcénien » comme le désigne Elmi (1972) dans les Monts de Tlemcen et les Traras occidentaux. Il s'agit d'un bassin largement couvert par la transgression messinienne qui y a laissé de vastes dépôts de grès et de calcaires à coraux, ainsi que des marnes calcaires. Une activité volcanique néogène, récente et variée dans le temps et l'espace a également été observée : principalement effusive au Miocène supérieur (réduction SE des Traras), puis phréatomagmatique au Pliocène et au Quaternaire en basse Tafna. Cela lui confère différentes caractéristiques morphologiques et morpho structurales (Remaoun, 2003).

Même si la Tafna et ses principaux affluents présentent une configuration sinueuse et méandreuse, sa densité et son abondance augmentent dans le même sens que le volume des reliefs, c'est-à-dire vers le Sud. Les apports les plus significatifs et les plus variables pour la moyenne et la basse Tafna se produisent pendant l'hiver et le printemps, tandis que les apports restent faibles pour le reste de l'année.

Cinq barrages, du plus ancien au plus récent, alimentent le bassin hydrographique de la Tafna, à savoir Beni Bahdel (66 Hm³), Meffrouch (15 Hm³), Sidi Abdeli (110 Hm³), Hammam Boughrara (177 Hm³) et Sikkak (27 Hm³) ([Dahmani et al, 2003](#)).

La Tafna a six affluents dans son bassin versant. Situé dans la partie sud de la Tafna, le sous bassin de Sebdou couvre une superficie de 602 km². Son exutoire se trouve à l'entrée du barrage de Beni-bahdel, où le cours d'eau prend sa source à Ghar Boumaaza. Le sous-bassin est peuplé d'environ 44 868 habitants. Avec une superficie de 378 km², le sous bassin de Khémis se trouve dans la partie sud de la Tafna et son exutoire se trouve à l'entrée du barrage de Beni-bahdel. Sa population était d'environ 11 318 habitants en 2009. La superficie du sous bassin de Chouly, situé dans la partie Est de la Tafna, est de 288,9 km² elle a son exutoire dans la commune d'Oued Lakhdar. Le sous-bassin est peuplé d'environ 5262 habitants. La superficie du sous-bassin d'Isser est de 1140 km² et se trouve dans l'est de la Tafna. Depuis la construction du barrage Sidi Abdelli, sa disponibilité en eau a considérablement diminué, ce qui a permis de préserver la majorité de l'eau pour l'irrigation. Situé dans l'est de la Tafna, le sous bassin de Sikkak s'étend sur une superficie de 463 km². Finalement, le sous bassin de Mouilah, qui couvre une superficie de 2650 km², se trouve dans l'Est de la Tafna, ce qui en fait le plus grand sous bassin, cet affluent est contaminé par les eaux usées domestiques et les effluents industriels de la ville marocaine d'Oujda et par les affluents secondaires (l'Oued Ouerdeffou et l'Oued El Abbas) de la ville de Maghnia ([Bensaoula et Adjim,2008](#) ; [Zettam,2018](#)).

Environ 40% de la surface totale du bassin versant de la Tafna est occupée par la végétation naturelle, qui comprend des forêts et des maquis. La forêt de chêne vert et de pin d'Alep occupe la majeure partie des terrains dans la zone montagneuse Sud, au-dessus de 1200 m d'altitude. La forêt d'Ahfir est caractérisée par des terrains riches en silice où se rencontre le chêne liège. À une altitude inférieure à 1200 mètres, on peut observer une combinaison d'Oxycèdre, de quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Tuya. Les terrains cultivés occupent les terrasses et le fond des vallées de l'oued Tafna, tandis que les pentes sont couvertes de garrigues, ([Taleb,2004](#)).

La végétation ligneuse est remplacée dans la zone Nord, sur sol argilo-marneux, généralement profond, par les cultures céréalières, fruitières et surtout maraichères. La végétation naturelle qui subsiste, y compris le Tamarix et le Laurier, ne se manifeste que par des taches peu étendues ([Taleb ,2004](#)). Dans la Tafna, l'agriculture joue un rôle essentiel (figure 15). Elle est caractérisée par la culture des céréales (170.000 ha), de l'arboriculture (26 280 ha) et de la culture maraichère (7695 ha) ([Zettam, 2018](#)).

Les précipitations annuelles (Figure II-2) varient entre 260 mm dans la plaine de Tlemcen à 650 mm sur les sommets des Djibels de Tlemcen ([Zettam,2018](#) ; [Bouguerra et al,2019](#)). Les débits des Oueds du bassin de la Tafna sont caractérisés par de fortes irrégularités mensuelles et annuelles, avec une précipitation moyenne annuelle de 394 mm, et des précipitations mensuelles maximales de 45 mm en novembre et décembre, et 54 mm en février et mars, avec des précipitations minimales de 1 à 2 mm en juillet ; des crues à très fort débit instantané à différentes périodes de retours, pouvant engendrer des inondations et un débit d'étiage très faible à nul, s'étalant du mois de juin jusqu'à septembre ([Mami,2020](#)).

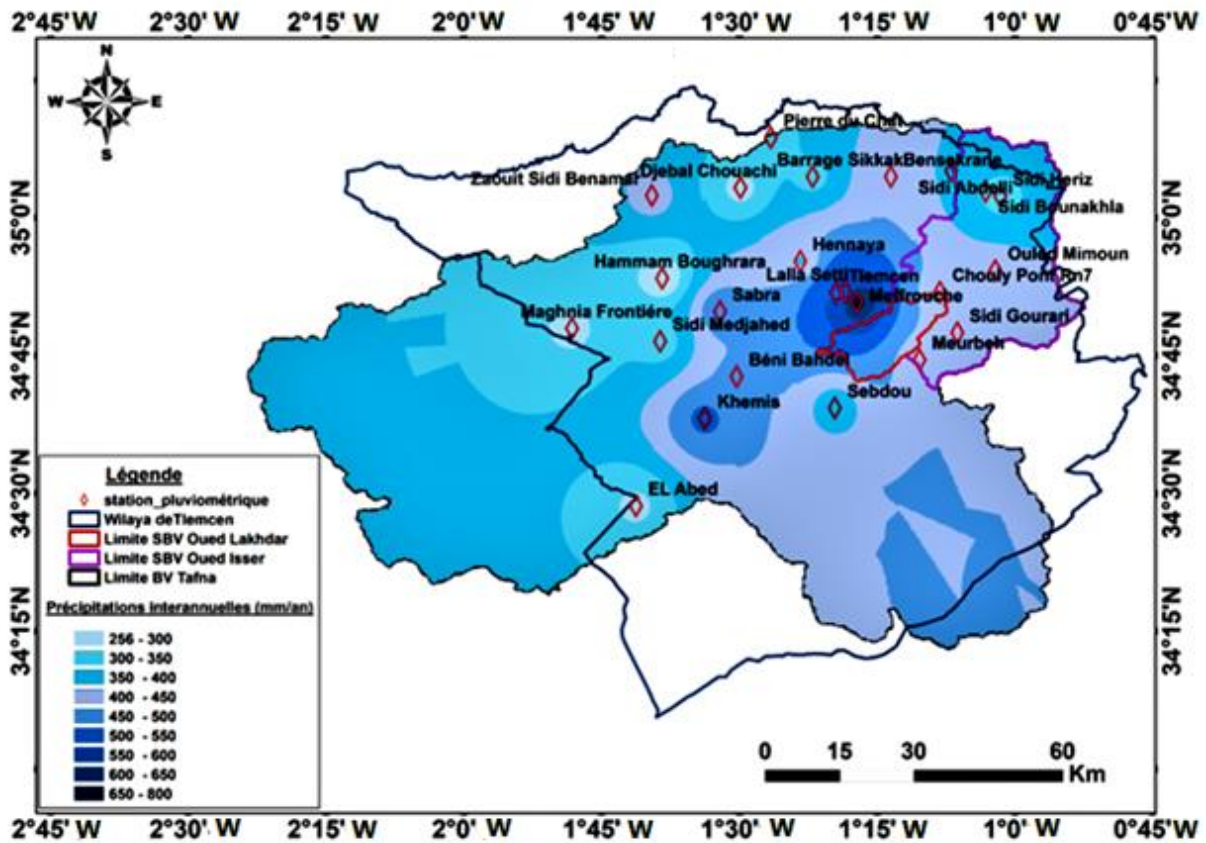


Figure II-2 Précipitations moyennes interannuelles (1969-2022) de bassin versant de la Tafna

II- 2. Le bassin versant de l'Isser

Situé à l'est de la wilaya de Tlemcen, le bassin versant d'Isser est légèrement au nord. La superficie s'élève à 1140 km² ; et son aval correspond au barrage. À Sidi Abdelli, Izdihar. L'emplacement du bassin est compris entre 1°20'31" et 0°52'28" W et 34°41'22" et 35°09'37" N. Dans la partie sud du bassin versant, le relief est principalement montagneux, avec des pentes qui dépassent souvent 35%. Au Nord, le paysage est principalement composé de collines marneuses à pentes douces. Sur près de 32% de la surface du bassin versant, la pente est supérieure à 30%. Le bassin versant sud est entièrement couvert de calcaires sur des dolomies d'âge jurassique qui s'étendent vers le nord.

La zone d'étude est composée de formations avec des intercalations gréseuses au Nord et à l'Est. On trouve des alluvions terrasses du Pliocène à l'Est (Mazour, 1992). Le pourcentage de sols perméables est de 60 %, le reste étant constitué de sols non perméables. Le pourcentage de sols résistants s'élève aussi à 43% (Bouanani, 2004).

Le bassin versant présente un réseau hydrographique dense, comprenant un oued principal appelé Isser et ses affluents : l'oued Chouli, l'oued Fernan, l'oued Ben Hadi et l'oued Beniane. L'oued Isser est un affluent de la rive droite de la Tafna qui mesure 81 km de long et est alimenté par une source à Ain Isser au sud de l'oued Mimoun, (Figure II-3).

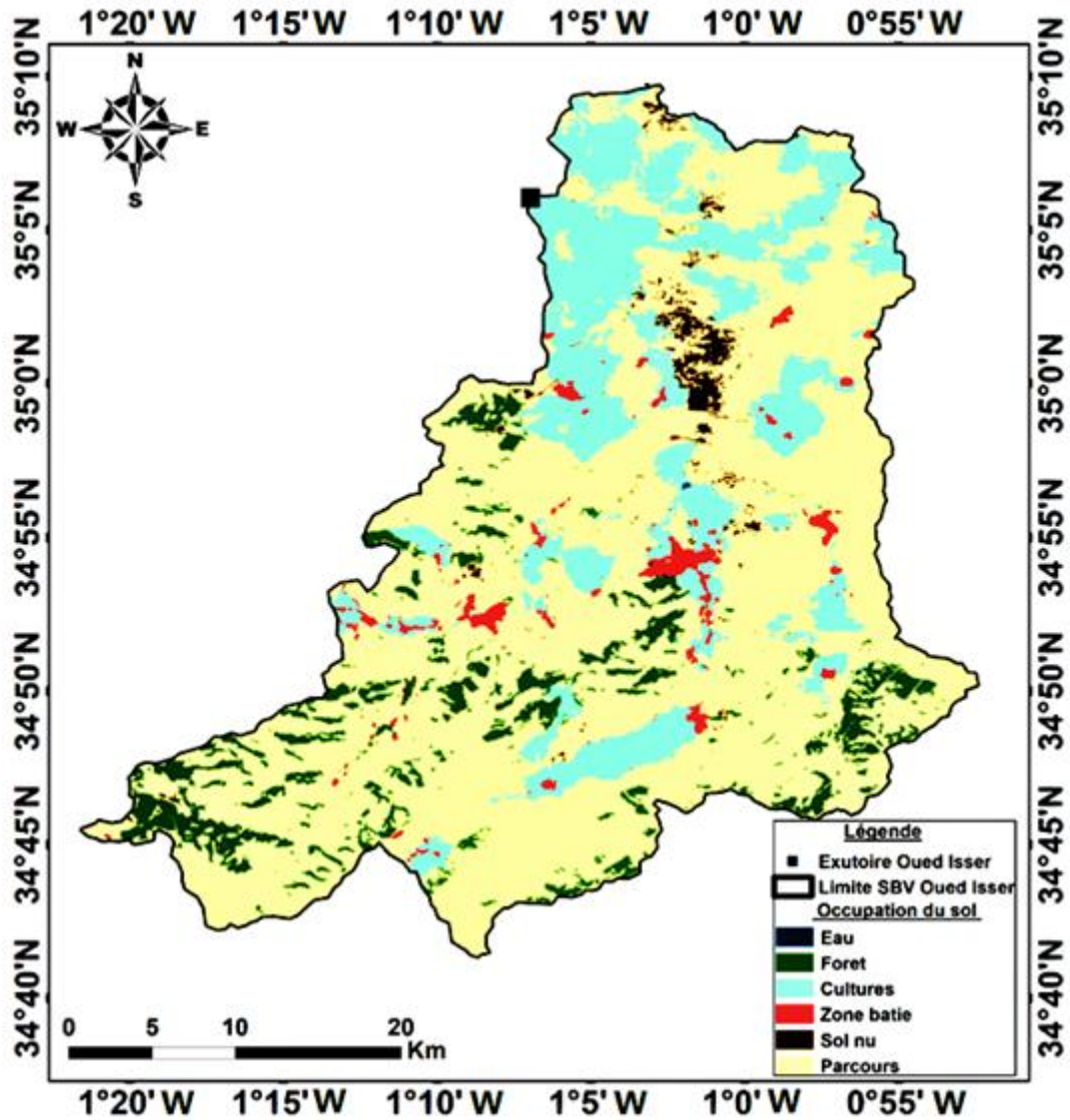


Figure II-4 Occupation de sol du bassin versant de l'Isser.

II- 3. Présentation de la zone d'étude

Oued Lakhdar, jadis nommée Oued Chouly, est une localité qui existait bien avant l'arrivée des Turcs. Ses villages ayant connu la présence d'anciennes communautés humaines, notamment à Yebdar, Béni Ghazli, M'Zoughen, Tamekchent, Ouled Sid El Haj, etc. Elle portait alors le nom d'Oued Chouly (Chouly signifiant le dromadaire rougeâtre de sept ans). Elle a été une zone de transhumance, beaucoup d'éleveurs des zones steppiques venaient se réfugier aux pieds des montagnes de Chouly, ramenant avec eux dromadaires et ovins et y passaient tout l'été et une grande partie de l'automne. D'autres se sont sédentarisés, suite à l'aide qu'ils ont apportée à Abou Tachfine (prince berbère de Tlemcen) (Diaf et al, 2024).

La zone d'étude couvre une superficie de 288,9 km² et un périmètre de 115 km. La zone contrôlée à la station de mesure hydrométrique s'étend sur 170 km² dans un rayon de 60 km. (Figure II-5) (Gherissi,

et al,2021 ; Diaf et al,2024). L'Oued Lakhdar est un cours d'eau qui comprend plusieurs sources qui alimentent les villages suivants : Aïn Ouissert, Aïn Tot Hamam et Aïn Béni Hella.

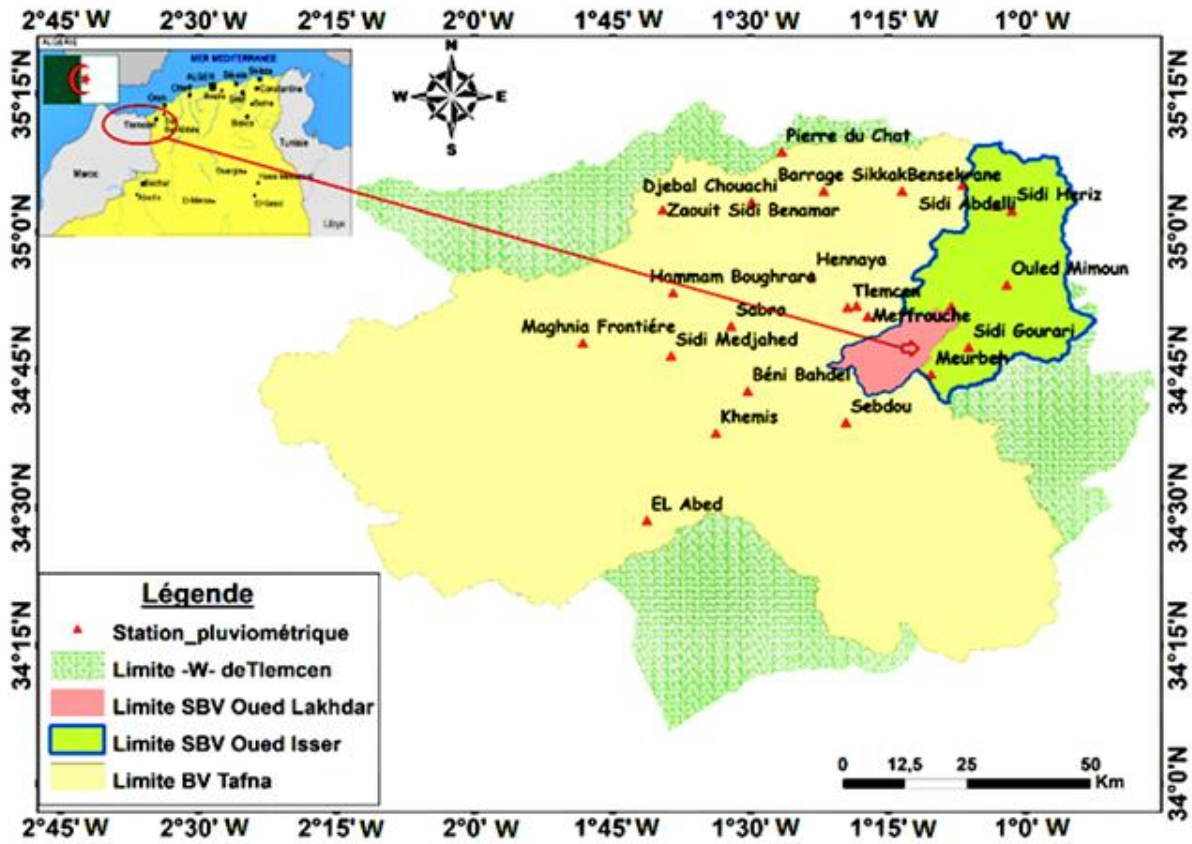


Figure II-5 Localisation du bassin versant d'Oued Lakhdar

II- 3.1. Les Caractéristiques physiques de la zone d'étude

L'indice de Gravelius indique que la forme du bassin versant a un impact significatif sur l'écoulement et surtout sur l'aspect de l'hydrogramme obtenu lors d'une pluie spécifique.

- Gravelius a défini l'indice de compacité (qui porte d'ailleurs son nom) comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant même surface. Cet indice permet de comparer les bassins entre eux. Le rectangle équivalent c'est une transformation purement géométrique où la forme du bassin est rendue comme étant celle d'un rectangle ayant même périmètre et même superficie que le bassin versant (Bendjoudi et Hubert, 2002).

$$K_G = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (II-1)$$

Avec :

K_G : l'indice de compacité de Gravelius,

A : surface du bassin versant [km^2],

P : périmètre du bassin [km].

Le coefficient K_G de Gravelius est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée, et proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire.

L'indice de compacité élevé ($K_c = 1,28$) reflète la forme concave du bassin versant de l'Oued Lakhdar. Le tracé hydrographique suit, en pratique, tous les grands accidents qui ont eu un impact sur les formations carbonatées des formations géologiques jurassiques, (Figure II-6).

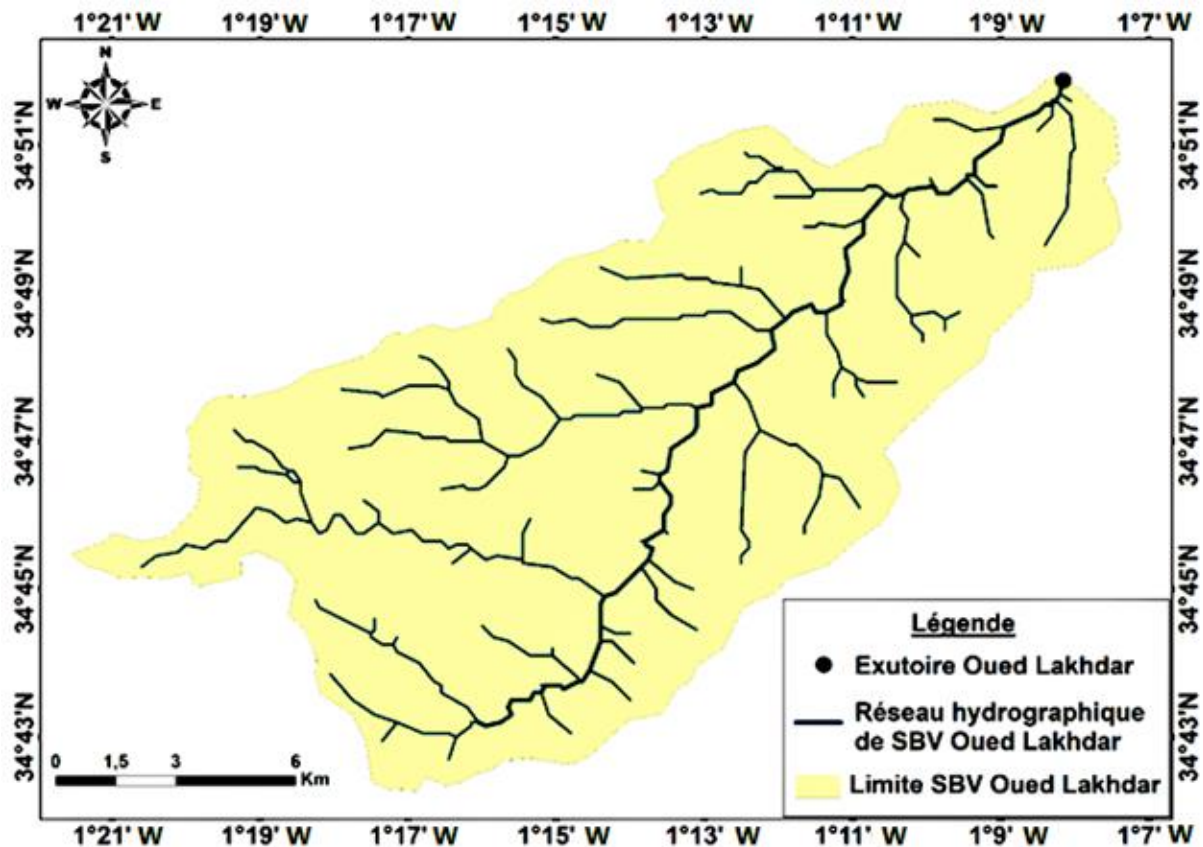


Figure II-6 Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Lakhdar

- Indice de forme de Horton (K_H) : Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal ([Horton, 1932](#)).

$$K_H = \frac{A}{L^2} \quad (II-2)$$

Avec :

K_H : Indice de Horton sans dimension.

$K_H < 1$: Bassin de forme allongée.

$K_H > 1$: Bassin de forme ramassée.

A : L'étendue de l'embouchure (Km²).

L : Distance du principale rivière (Km).

L'indice de forme de Horton ($K_H = 0.18$) < 1 , donc le bassin d'Oued Lakhdar de forme allongée. Les reliefs jouent un rôle important dans la détermination de l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. La région du Massif Tellien abrite l'Oued Chouly, un relief montagneux qui fait office de protection naturelle contre le vent et offre de nombreuses possibilités de formation (Gherissi, 2012). La particularité de sa vallée verdoyante réside dans sa fertilité, entrecoupée de deux chaînes de montagnes parallèles :

- La première est formée de la série des djebels (Taksent, Tichtiouine, Mezoughène et Sidi Chaïb), dont le point culminant est de 1311 m ;
- La deuxième est la série de monticules représentés par djebel Tazkninet, djebel Sidi Hamza, djebel Dar El Matmar et djebel Dar Sidi Cheikh, dont le point culminant est de 1420 mètres.

Les sommets les plus élevés avec une altitude entre 1500 et 1600 m, se trouvent au sud dans l'extrémité de bassin versant d'Oued Lakhdar qui représente un pourcentage de 2%, (Figure II-7) avec une altitude maximale de 1606 m. Les altitudes entre 1300 et 1400 m représentent les pourcentages les plus élevés dans le bassin versant avec une valeur de 33%. La valeur minimale des altitudes à une valeur de 722m se trouve à l'exutoire de bassin versant d'Oued Lakhdar. Les altitudes, au niveau de la vallée, oscillent de 1 063 m dans la partie amont et 722 m dans la partie aval. Il apparaît donc que la dénivellée moyenne de la vallée (partie utile du territoire) est de 338 m sur une distance de 15km, soit une pente moyenne de 2,25 %. Ainsi, 75% de la surface d'étude (partie Sud) est caractérisée par une topographie accidentée. Cette morphologie reflète celle de l'ensemble physique abrupt des "Monts de Tlemcen". Au niveau d'Oued Chouly, la topographie générale est en forme dégradée (cascade), depuis

le point culminant à djebel Dar Sidi Cheikh (1420 m) jusqu'au point le plus bas matérialisé au niveau d'Yebdar Hella (722 m). La courbe (Figure II-8) montre une évolution constante en direction inférieure.

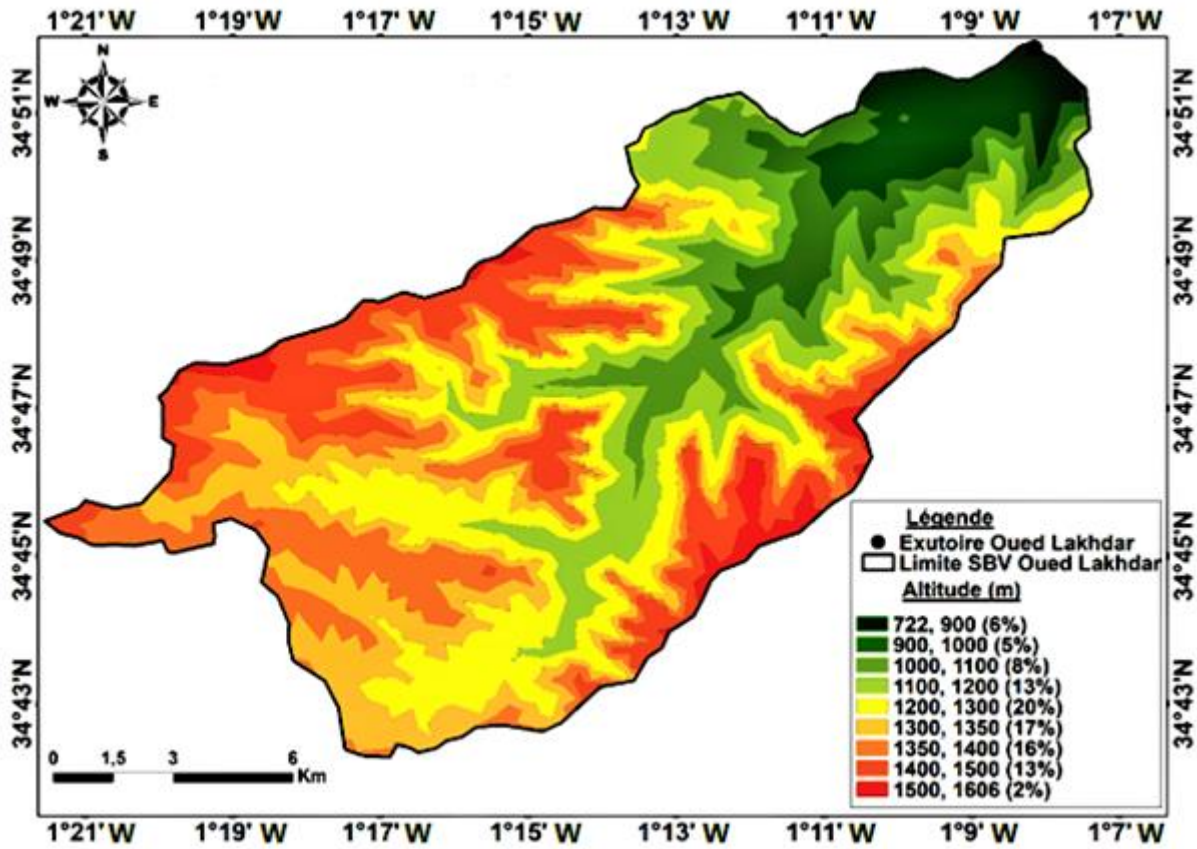


Figure II-7 Relief du bassin versant d'Oued Lakhdar

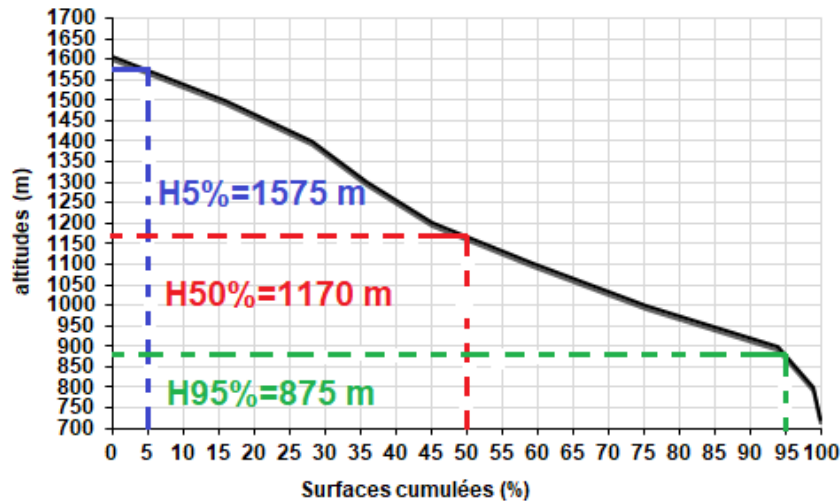


Figure II-8 Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lakhdar.

L'altitude médiane équivalent à H50% dans la courbe hypsométrique est égale à 1170 m. La dénivelé égale H5%-H95% est égale à 700 m. Les directions des pentes de la zone d'étude sont généralement

vers le nord-ouest et le sud-ouest, les terrains plats sont négligeables, (Figure II.09 et II.10). Les caractéristiques des altitudes sont regroupées dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : les altitudes de bassin versant d'Oued Lakhdar.

Bassin	Altitude Max (m)	Altitude Min (m)	Altitude médiane (m)	Altitude moyenne (m)	Altitude la plus fréquente (m)	Observation
Oued Lakhdar	1606	722	1170	1130	1300-1400	Equilibre

Plusieurs méthodes sont appliquées pour calculer la pente : la pente moyenne peu utilisée ; l'indice de pente de Roche long à évaluer et l'indice de pente globale simple à appliquer.

- **Indice de pente de roche** : Le rôle du relief est crucial, car il influence en grande partie la capacité de ruissellement des terrains. On peut évaluer son appréhension en utilisant l'indice de pente de Roche (I_p) fourni par la relation suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n X_i \sqrt{\beta_i} (a_i - a_{i-1}) \quad (\text{II-3})$$

β_i : La partie du bassin située entre les côtes a_i et a_{i-1} est représentée par X_i , qui correspond à la distance entre les courbes de niveau sur le rectangle équivalent. L représente la longueur équivalente du rectangle ; $a_i - a_{i-1}$ représente le dénivelé entre deux courbes voisines (m).

- **Indice de pente global** :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{II-4})$$

Avec : D : Dénivelée $Z_a\%$ - $Z_b\%$ définie sur la courbe hypsométrique entre 5% et 95% ou à l'œil sur la carte topographique ; L : Longueur du rectangle équivalent.

La classification des reliefs sur la base de l'indice global des bassins versants est représenté dans le tableau II-2.

Tableau II-2 : Classification d'OROSTOM des reliefs sur la base de l'indice des pentes global des bassins versants.

Relief extrêmement faible.	$I_g < 0,002$
Relief limité	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez limité.	$0,005 < I_g < 0,01$
Réconfort modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief plutôt puissant.	$0,02 < I_g < 0,05$
Force de résistance.	$0,05 < I_g < 0,1$
Relief extrêmement puissant.	$0,1 < I_g$

Dans notre bassin d'étude d'Oued Lakhdar, $I_g = 0,032$ compris entre $0,02 < I_g < 0,05$, donc les reliefs sont assez forts.

Après avoir calculé l'indice Gravelius et l'indice de Horton, on peut conclure que la zone d'étude est de forme allongée.

- **Dénivelée spécifique (D_s)** : à la différence de l'indice global I_g , la dénivelée spécifique D_s est indépendante de la surface et permet alors de comparer des bassins de tailles différentes.

$$D_s = D \sqrt{\frac{I}{L}} \quad (\text{II-5})$$

Avec

D : dénivelé ; I : la largeur de rectangle équivalent ; L : la longueur de rectangle équivalent.

La dénivelée spécifique D_s est indépendante de la surface et permet alors de comparer des bassins de tailles différentes.

La classification des reliefs sur la base de dénivelé spécifique des bassins versants est représenté dans le tableau II-3.

Tableau II-3 : Classification des reliefs sur la base de dénivelé spécifique des bassins versants.

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

Dans notre bassin d'étude d'Oued Lakhdar, la dénivelé spécifique $D_s = 416.43$ m ; compris entre $250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$, donc les reliefs sont forts.

- **Indice de pente moyenne (I_m)** : Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_m = \frac{H(0.5P_0 + P_1 + \dots + P_{n-1} + 0.5P_n)}{A} \quad (\text{II-6})$$

H : variation entre deux courbes de niveau adjacentes ;

P_0 : taille de la courbe de niveau inférieur ;

P_n : taille de la courbe supérieure ;

P_1 et P_2 : taille des graphiques de niveau intermédiaire.

I_m représente 21,6%. L'indice met en évidence la nature montagneuse de la région de l'Oued Lakhdar. Il souligne que les pentes sont extrêmement élevées.

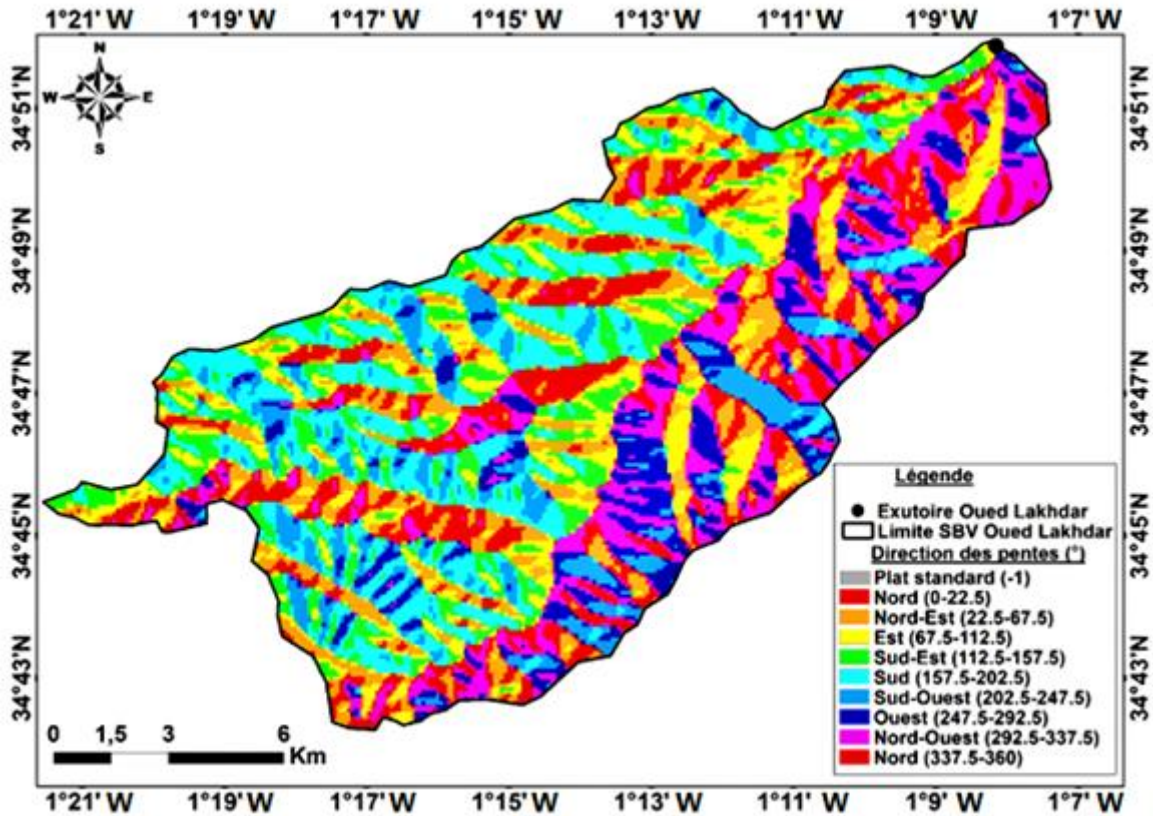


Figure II-9 Direction des pentes du bassin versant d'Oued Lakhdar.

La détermination des caractéristiques morphométriques (physiographiques), est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipité, débit de la rivière, bilan. etc.).

- La surface : La surface constitue l'aire de réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Le débit du cours d'eau à l'exutoire dépend donc en partie de la surface. La surface de bassin versant d'Oued Lakhdar égale à 170 Km²
- Rectangle équivalent : Est le rectangle de longueur L et de largeur I qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant.

$$\text{La longueur (L) : } L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (\text{II-7})$$

$$\text{La largeur (I) : } I = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (\text{II-8})$$

Avec :

L : la distance entre le rectangle (km)

I : L'écartement du rectangle (km)

La longueur de rectangle équivalent d'Oued Lakhdar est égale à 21.7 Km et la largeur de rectangle équivalent est égale à 7.68 Km.

- **Densité de drainage (D_d) :**

Le régime hydrologique d'un cours d'eau est influencé par des facteurs tels que la densité de drainage (D_d). L'identification du contour hydrographique d'un bassin versant est possible grâce à la compréhension de la densité de drainage. C'est la somme de tous les talwegs qui se déversent à la surface du bassin versant.

$$D_d = \sum \frac{L}{A} \quad (\text{II-9})$$

Avec :

D_d : Concentration de drainage en km/km² ;

L : Distance totale de tous les talwegs du bassin en kilomètres ;

A : L'étendue du bassin en km².

$\sum L = 12.36$ km.

A = 170 km².

$D_d = 0.072$ km⁻¹

- **La représentation du profil en long du cours d'eau principal**

Est réalisée en représentant les distances horizontales en abscisse et en affichant l'altitude en ordonnée selon les courbes de niveau de la région (Figure II-10). L'oued mesure 30 km de longueur.

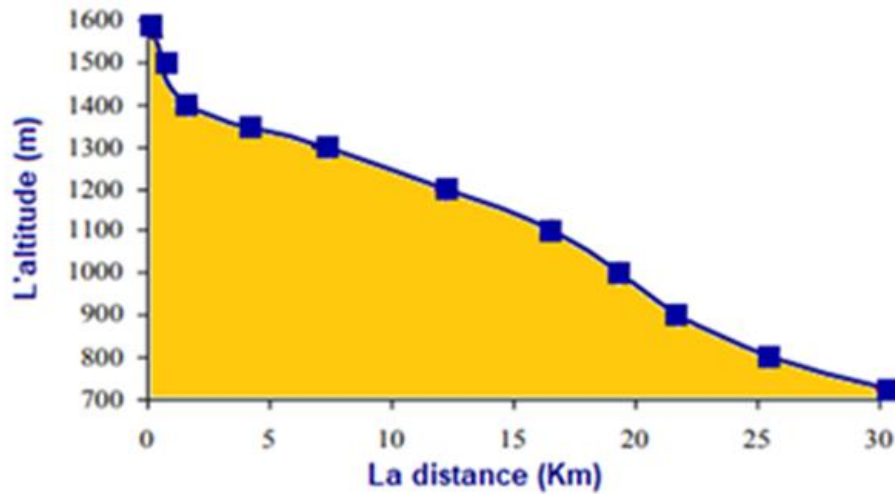


Figure II-10 Profil en long du principal cours d'eau de l'Oued Lakhdar.

Le tableau II-4 présente les données physiques et géométriques calculées et représentées.

Tableau II-4 Les propriétés hydro-morphométriques de la zone d'étude.

Caractéristiques	Valeurs	Unité
Surface	170	Km ²
Périmètre	60	Km
Indice de taille (Kc)	1,28	//
Indice de Horton	0,18	//
Indice d'inclinaison de roche (Ip)	0,19	//
Indice d'altitude globale (Ig)	0,032	//
Indice moyen d'inclinaison (Im)	0,216	//
Longueur de rectangle équivalent	21,7	Km
Largeur rectangle équivalent	7,68	Km
Longueur de talweg principal	30	Km
Densité de drainage	0,072	Km/km ²
Dénivelée spécifique	416,43	m

Les résultats obtenus à partir des valeurs calculées sont les suivants : l'indice de pente globale nous permet de classer la zone de l'Oued Lakhdar comme étant assez montagneuse ; l'indice de pente moyenne traduit clairement l'aspect accidenté de la zone ; la courbe hypsométrique reflète clairement l'aspect accidenté de la zone ; le dénivelé spécifique montre que les reliefs sont forts ; la pente descendante de l'Oued Lakhdar (Figure II-11) est caractérisée par sa courbe longitudinale qui descend progressivement vers l'Oued Lakhdar, un terrain moyennement incliné. La présence d'érosion causée par l'écoulement et les failles dans la zone en amont, ainsi que de sols meubles ou durs, est responsable des ruptures de pente qui se produisent avec l'enceinte profonde du lit de l'oued.

II- 3.2. Aperçu géologique

La lithologie a un impact sur la pénétration, la dégradation des terres, le ruissellement et le déplacement des particules. Les roches géologiques se distinguent par leur structure flexible ou solide. La nature des affleurements a un impact sur l'hydrologie de surface et le type de dépôt (Gherissi et al, 2021).

II- 3.2.1. Description litho stratigraphique

Selon Benest (1985) et Gherissi et al (2021), la lithologie des monts de Tlemcen est principalement calcaire (Figure II-11), tandis que la formation des grès de Boumediene constitue le "mégarythme" du Jurassique supérieur.

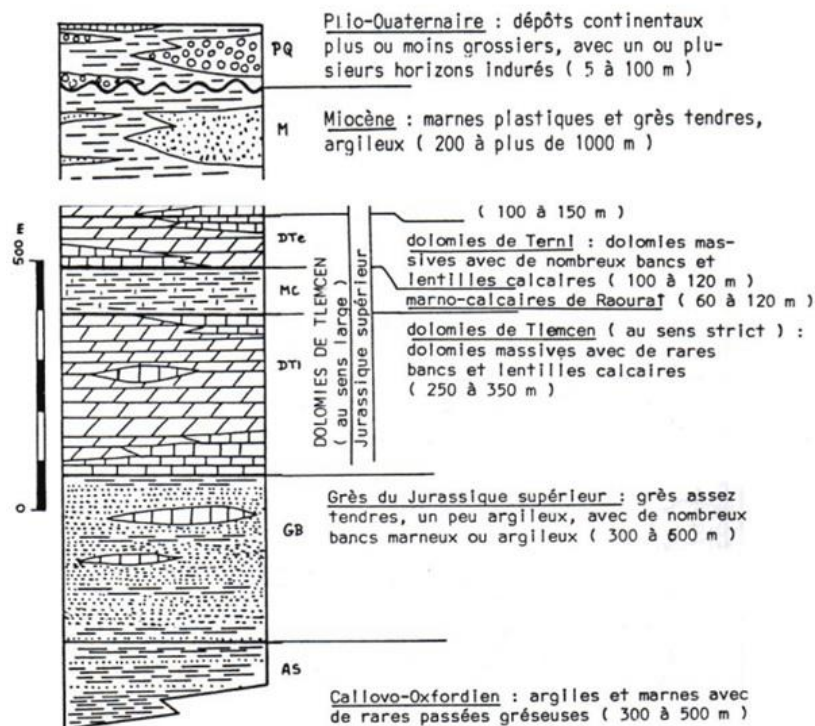


Figure II-11 Vue d'ensemble des formations principales présentes dans les monts de Tlemcen, (Collignon, 1986) In (Gherissi et al, 2021).

Plusieurs travaux sur la géologie de l'Afrique du Nord et notamment la région de Tlemcen, (Benest, 1985 ; Benest et al., 1999 ; Bensaoula, 2007 ; Mezouar, 2020) décrivent les formations géologiques d'âge

Jurassique supérieur et au Crétacé inférieurs principalement formés de carbonates. Selon la carte géologique établie par (ANAT, 2010), le bassin agricole de Tlemcen repose essentiellement sur les formations géologiques suivantes : miocène supérieur marin, pliocène continental, quaternaire continental, jurassique supérieur et moyen et des alluvions actuelles (Figure II-12).

- **Le jurassique** : On distingue :
 - **Le jurassique moyen (dogger)** : formé par un ensemble de calcaires surmontés par une épaisse série argilo-calcaire et enfin des calcaires micros gréseux.
 - **Le jurassique supérieur** : cette formation présente une grande surface d'affleurement, dont les plus importantes sont celles du plateau de Terny et d'Ouled Mimoun.
- **Miocène supérieur marin** : est formé d'alternances de marnes et grès quartzeux.
- **Pliocène** : C'est une formation qui présente une intercalation de grès rouge avec grains fins et de marnes sombres.
- **Le quaternaire** : Ces formations sont souvent continentales, caractérisées par des vieilles formations pédologiques : croûtes calcaires, gypseuses, limoneuses à nodules calcaires, etc ...

Les formations géologiques dominantes dans la commune d'oued Lakhdar sont les dolomies calcaires. Il y a deux formations de marno-calcaire qui sont représentées symétriquement par rapport à l'oued dans la partie Nord de la commune : de Djebel El Chaïb, Djebel Sidi hamza, et Djebel Dar El Matmar. Il faut noter également la présence d'alluvions dans l'extrême Nord de la commune (Bensaoula,2007).

a. Le calcaire : Le calcaire est une roche sédimentaire formée de carbonate de calcium.

b. La dolomie : La dolomie est un calcaire comprenant du carbonate double de magnésium et de calcium.

c. Les marno-calcaires : Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et de 65 à 95 %.

d. Les alluvions : Les alluvions, qui appartiennent également à la catégorie des terrains de recouvrement, se situent dans les fonds de vallées actuelles.

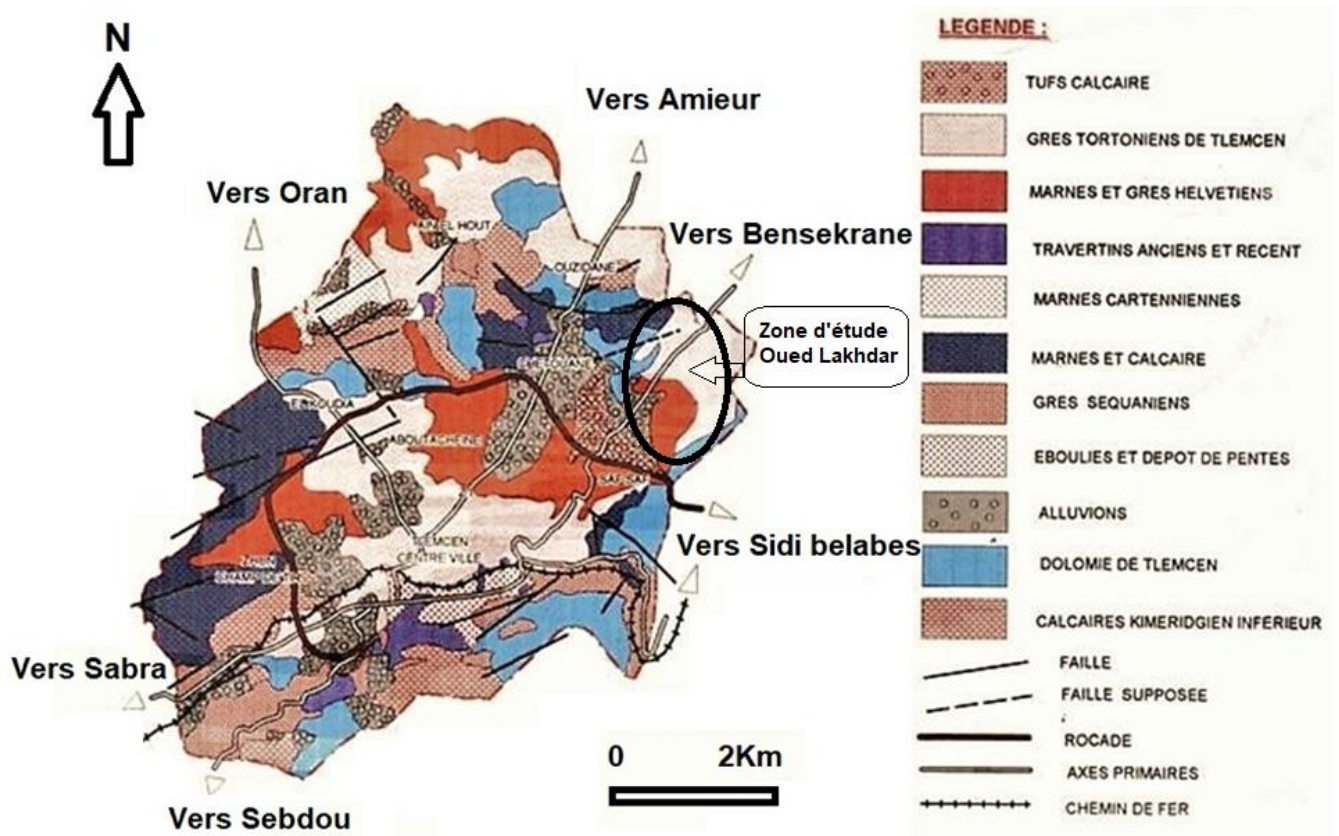


Figure II-12 Carte géologique du groupement urbaine Tlemcen-Mansourah-Chetouane (Aïssa Mamoune, 2002) In (Belabbaci, 2014).

II- 3.2.2. Géomorphologie

La géomorphologie est utile à la pédologie, qui est pour sa part l'indispensable conseillère de l'agriculture.

La géomorphologie est l'étude des formes et formations superficielles de l'interface terrestre, variables importantes, servant à la description phytoécologique régionale et sectorielle (Auclair et Biehler 1967).

Les reliefs du bassin versant d'Oued Lakhdar fait partie des monts de Tlemcen (Figure II-13), qui font partie d'un ensemble de reliefs de l'Afrique du Nord et ils sont formés de reliefs accidentés et ont des pentes de plus de 20 % et sont couverts par un tapis végétal, plus ou moins dense, qui les protège d'une érosion plus ou moins intense à l'exception de quelques îlots, tels que la zone de Béni-Snous où la roche-mère affleure (Gherissi, 2012).

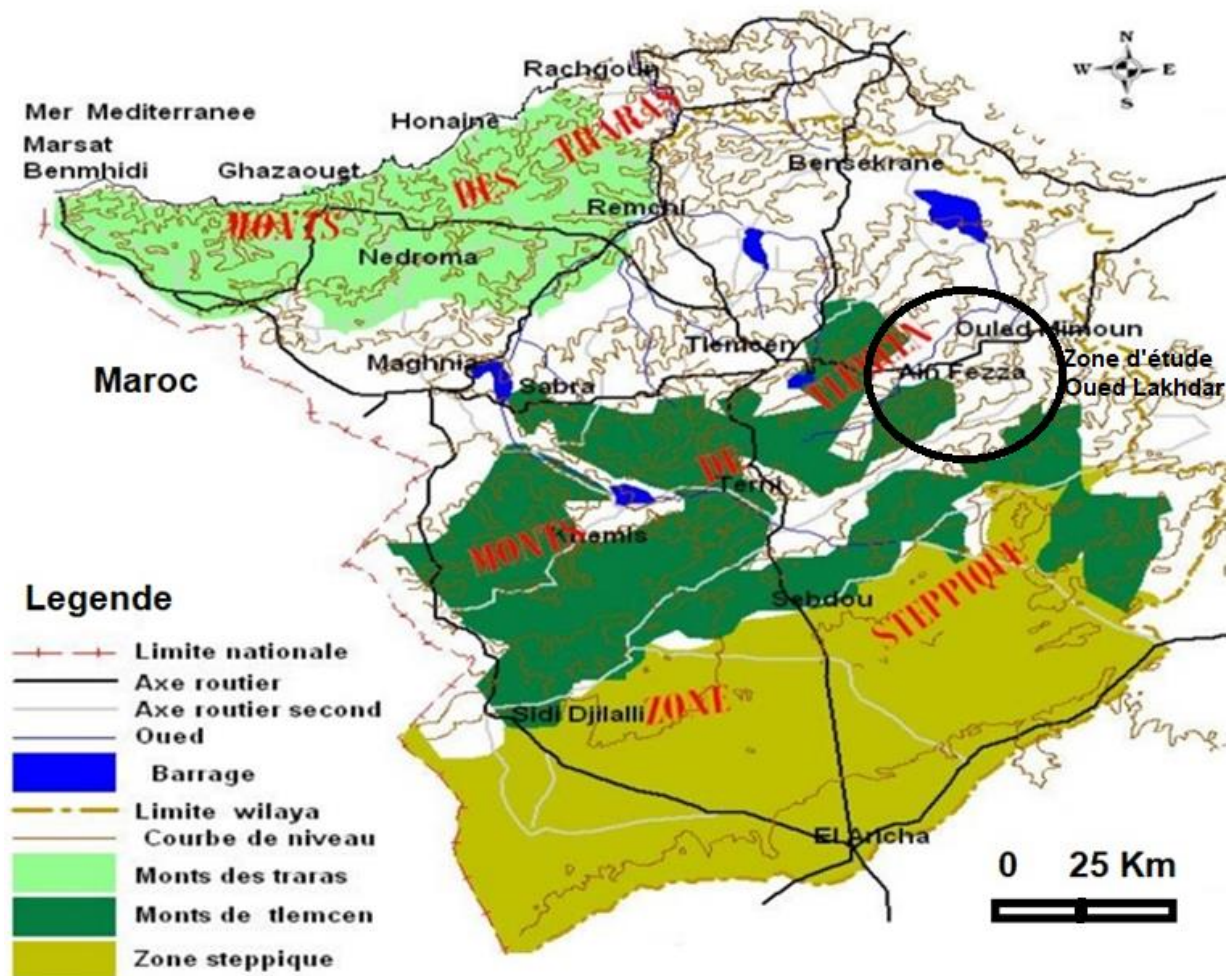


Figure II-13 Carte géomorphologiques de la wilaya de Tlemcen

(Benkelfat, 2020)

II- 3.2.3. Pédologie

En 1972, Benchetrit souligne que : « le climat devient plus sec et les conditions de semi-aridité règnent, la pluviosité n'est pas forte pour modifier le complexe absorbant des profils des sols ». Le sol influe sur l'environnement qui règle la répartition de la végétation.

Duchauffour (1977), signale que : « la majorité des sols des régions méditerranéennes tout au moins d'un climat de type méditerranéen sont caractérisés par des sols dits « fersialitiques » (Gherissi, 2012), (Figure II-14-b).

- **Sols fersialitiques :**

Ils sont largement répandus sur les Monts de Tlemcen (Figure II-14-a) et se rencontrent principalement sur les parties assez bien arrosées. Ils sont considérés comme anciens dont l'évolution est accomplie sous forêt caducifoliée en condition fraîche et humide.

La station d'Oued Lakhdar présente une texture globale limono-argileuse, la charge en calcaire est généralement moyenne, les sols non salés avec une couleur brune ; la station présente un pH alcalin dû probablement à la présence de calcium.

En effet les valeurs du pH dépendent en grande partie du taux du calcaire total. La roche mère est de nature argilo-marneuse affleure par endroit et les sols bruns fersialitiques sont les principales caractéristiques de cette station (Bensaoula, 2007).

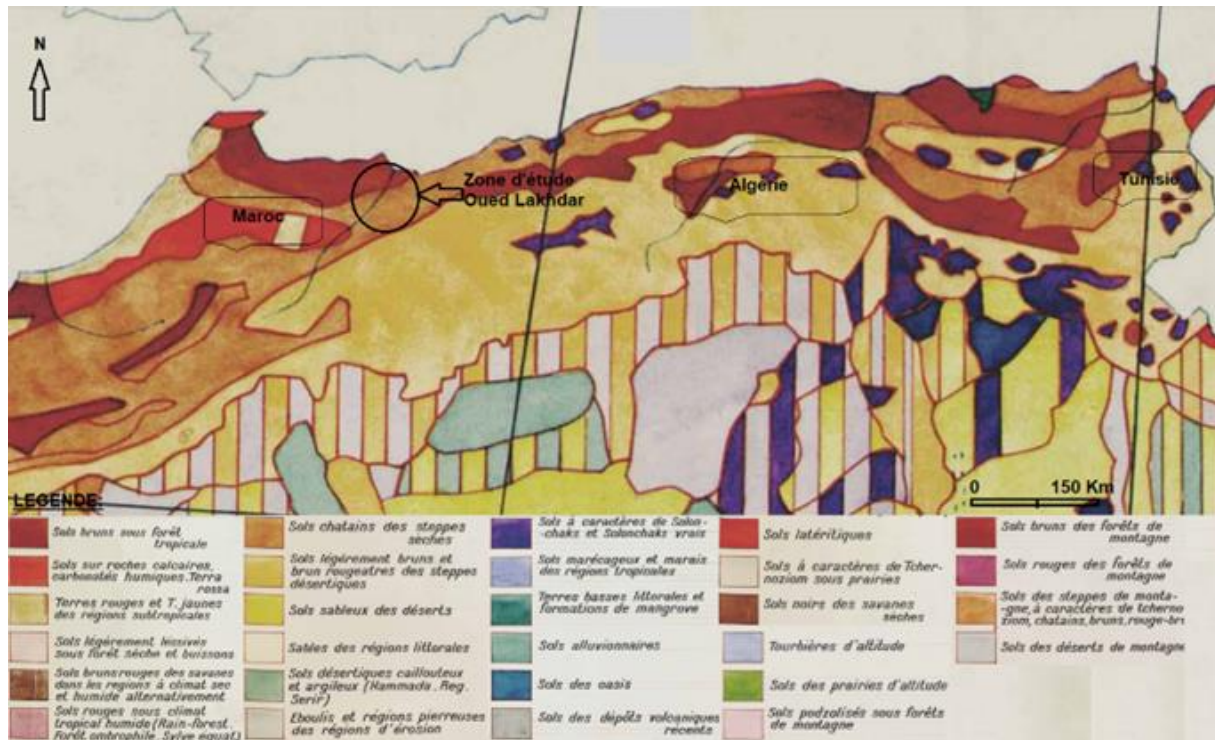


Figure II-14 Carte pédologique de la régions méditerranéennes (Bensaoula, 2007).

II- 3.3. Aperçu hydrogéologique

Grâce à la configuration du relief et à l'abondance des roches imperméables (argiles, marne et travertin), un réseau hydrographique important a été créé. Ce réseau est en grande partie lié à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont impacté la région au cours des aires géologiques (Figure II-15).

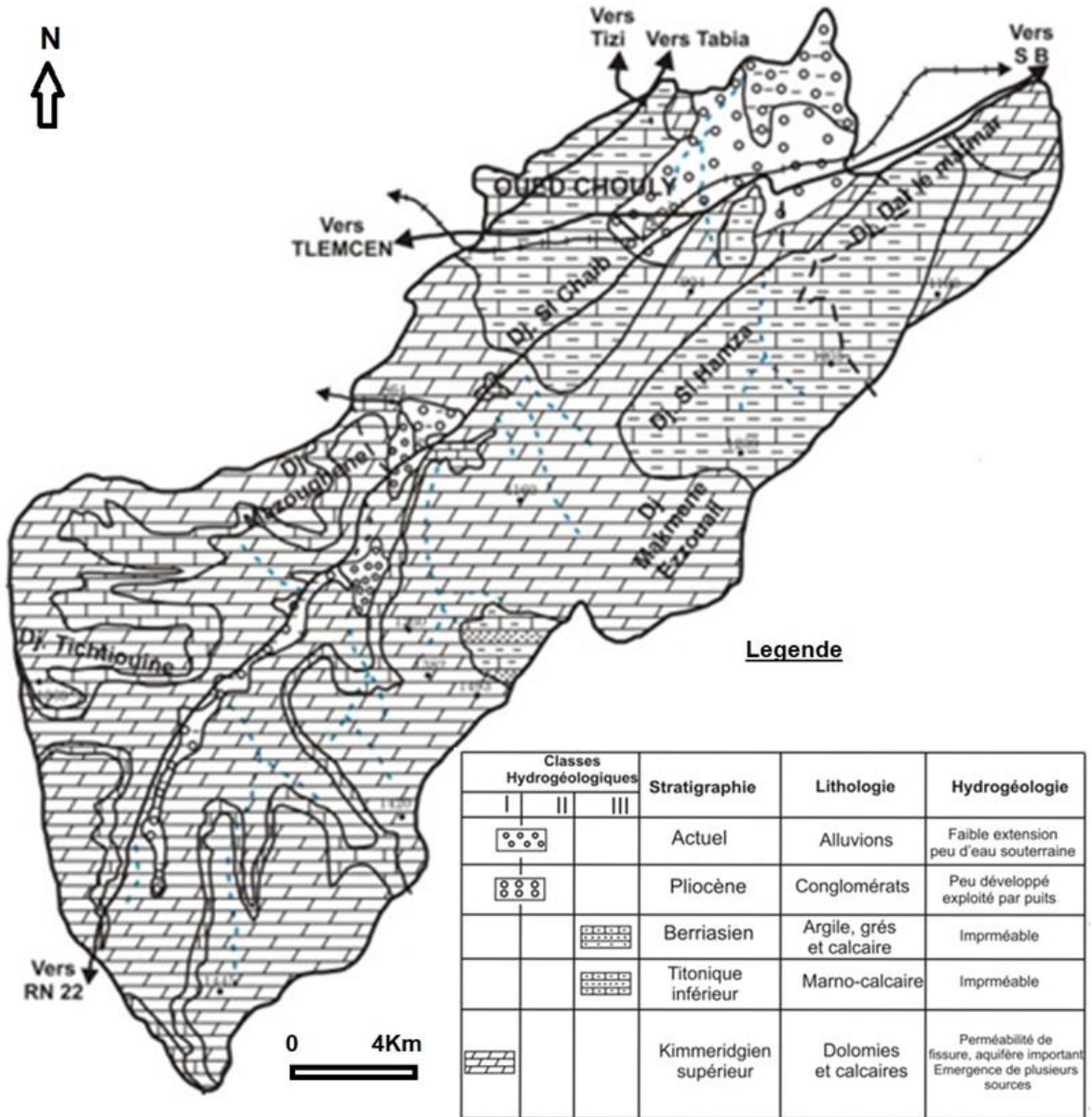


Figure II-15 Analyse hydrogéologique de l'Oued Lakhdar (Mouzouna et Ould-Saadi, 1994).

II- 3.3.1. Aquifère hydrographique

Les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur sont les plus vastes et les plus transmissifs, ce qui les rend parfaitement renfermés dans les aquifères. En raison de l'intensité de la karstification et des fissures, ainsi que de la présence de nombreuses sources aux points bas, ces formations présentent un intérêt hydrogéologique important (Gherissi et al, 2021).

II- 3.3.2. Réciprocité entre fracturation et karstification

La position lambertienne de la grotte de Yebdar est X=143, Y=180,05, Z=1101. La grotte de Beni Add ou grotte d'Ain Fezza. À l'entrée de la grotte, une analyse des cavités permet de saisir l'orientation des cavités de Nord-100°-Nord-Est-120° (Gherissi et al,2021).

II- 3.3.3. Les eaux souterraines

Dans les formations karstiques et calcaires-dolomitiques, l'eau souterraine joue un rôle essentiel, et des zones favorables sont accessibles sur les hauteurs de cette formation (Figure II-16). Située au nord de l'Oued Lakhdar (Lasгаа, 2012), cette région se trouve bien. Des puits existent. Au printemps ; Émergence : La principale caractéristique du bassin est la présence de plusieurs sources. Deux facteurs contribuent à l'augmentation des apparitions. C'est l'éclatement du massif en crêtes et rifts qui représentent des aquifères complètement déconnectés et l'incision des vallées.

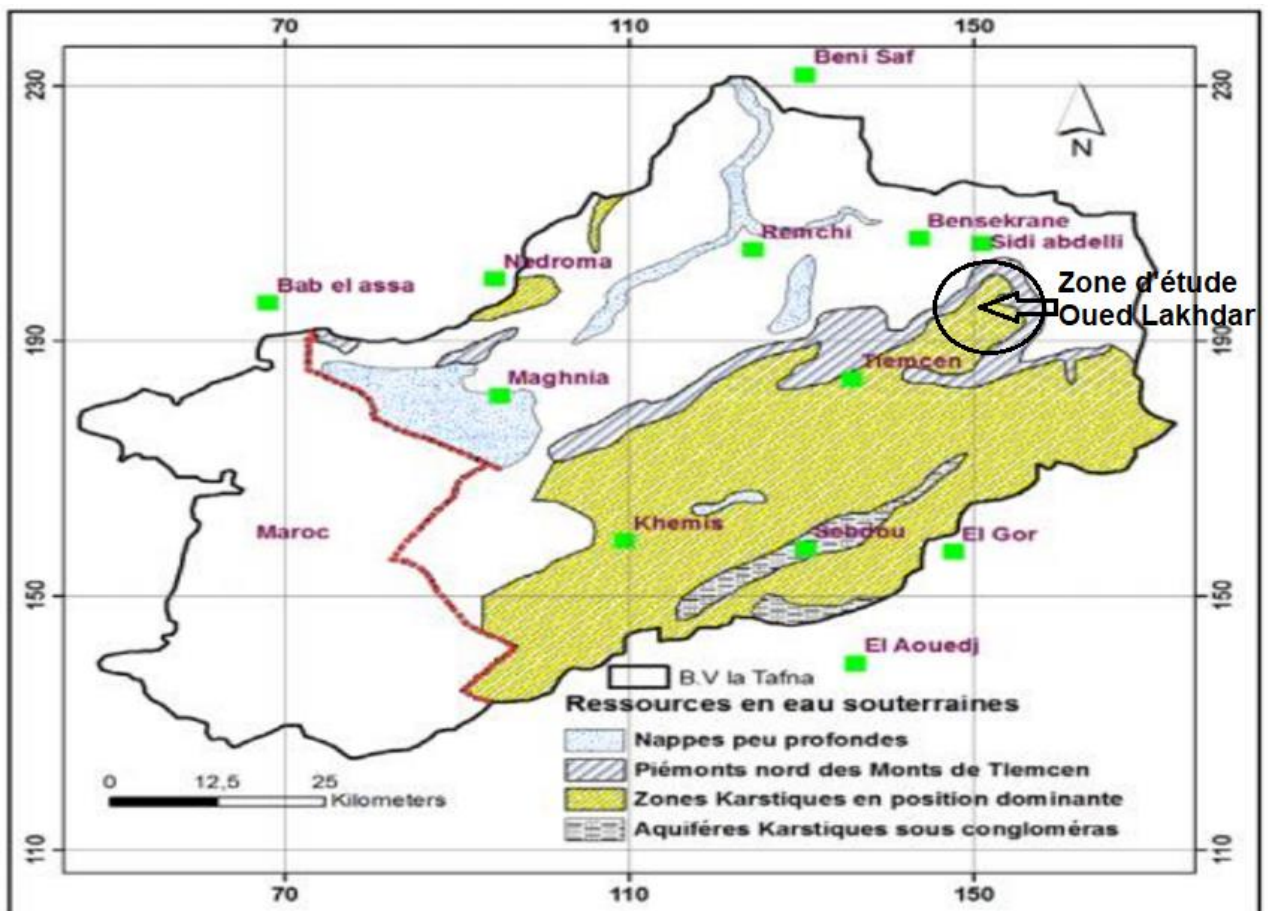


Figure II-16 Système Aquifère De La Tafna, (Rouissat, 2016).

II- 3.3.4. Les ressources en eau superficielle

Les ressources de surface dans le bassin de Tafna sont mobilisées par cinq barrages en exploitation d'une capacité totale de 385 Hm³ (Figure II-17), et un sixième barrage, Souani (13 Hm³), est connu pour être inactif. Ce dernier était destiné à contenir l'excédent du barrage de Beni Bahdel, mais n'a reçu aucun apport. Les cinq barrages servent à alimenter en eau potable certains centres urbains et ruraux.

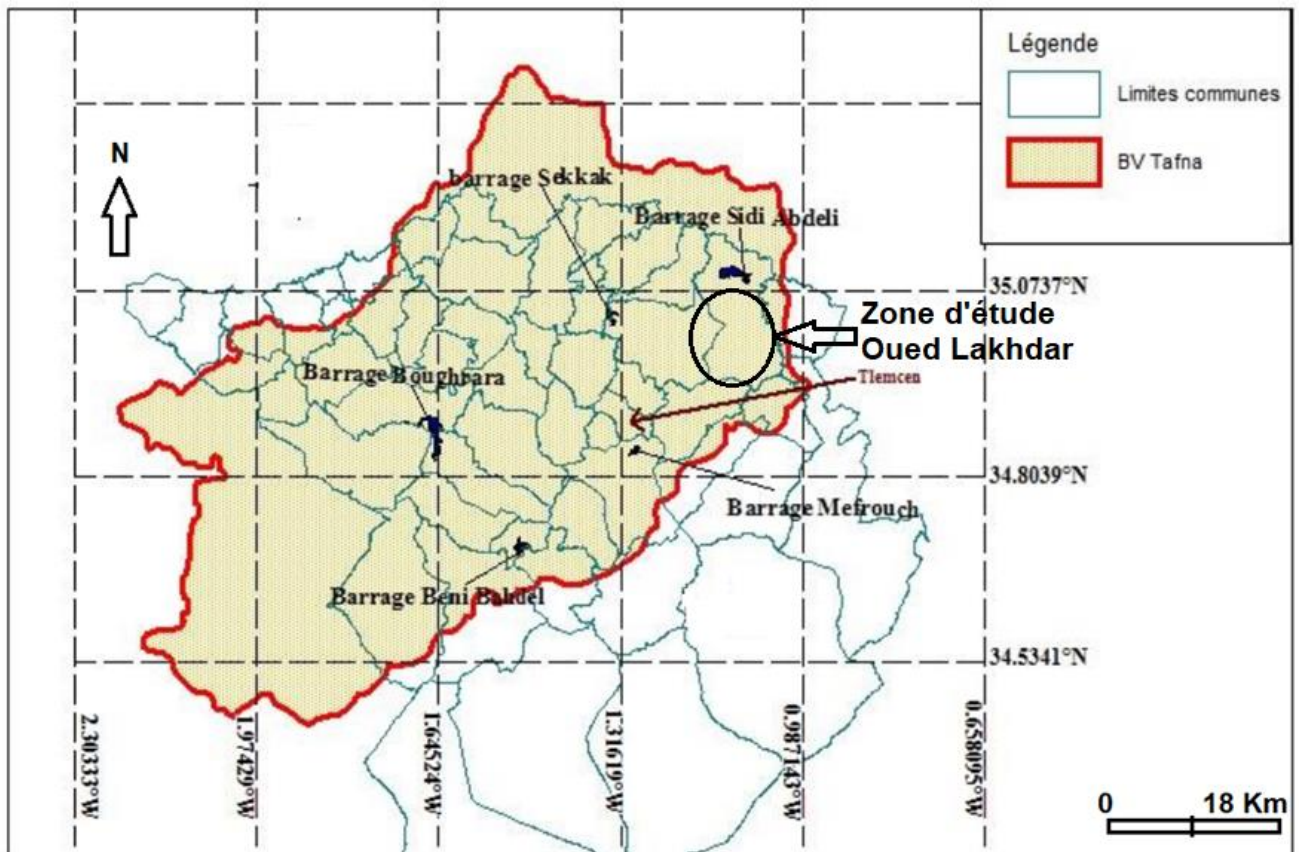


Figure II-17 Situation Géographique Des Barrages De La Tafna (Rouissat, 2016).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous récapitulons les caractéristiques physiques principales de la zone d'étude (Oued Lakhdar). De ce point de vue, la proximité géographique n'a pas d'impact significatif sur le zonage. Les caractéristiques physiques du bassin se sont avérées être le principal facteur influençant plus ou moins sur la variation spatiale. En effet, des études sur les caractéristiques physiques de ces bassins ont montré que la classification statistique des différents sous-bassins en différents groupes est principalement due à leurs caractéristiques de forme (superficie, périmètre, coefficient de compacité de Gravelius, longueur, largeur). C'est pourquoi les bassins de plus grandes dimensions se démarquent toujours plus que les autres. La zone d'étude est caractérisée par :

- Le territoire s'étend sur 170 km² ;
- Climat semi-aride ;
- Conditions d'écoulement irrégulières ;
- Une morphologie allongée qui favorise l'érosion linéaire ;
- Le bassin versant de l'Oued Lakhdar est dominé par *Calycotome intermedia*, *Chamaerops humilis* et *Olea europaea* et présente un taux de reconstitution assez élevé ;
- Le bassin versant de l'Oued Lakhdar présente un indice de sécheresse élevé, proportionnel à la dominance des espèces végétales. La dominance des traits végétatifs innés est associée à l'invasion d'espèces annuelles dispersées par troupeaux ;
- D'un point de vue bioclimatique, le climat du bassin favorise la prédominance des xérophytes, notamment des plantes végétales. Ces différentes adaptations ne s'appliquent pas à toutes les espèces et conduisent donc d'une part à une réduction du couvert végétal, voire à son extinction, et d'autre part à la propagation et à l'implantation d'autres plantes ;
- D'un point de vue morphologique, les espèces herbacées annuelles prédominent ;
- Les recherches géologiques et structurales ont donné lieu à une description claire de la stratigraphie lithique ;
- Au niveau pédologique, la zone de l'Oued Lakhdar est généralement argileuse avec des sols moyennement calcaires et ferrugineux bruns.

Chapitre III

Climat de la zone d'étude et l'effet de la sécheresse

Introduction

L'Algérie est un pays aride à semi-aride, confronté à des sécheresses fréquentes, cela crée des pénuries d'eau, nuisant à l'environnement, à la société et au bien-être des populations. La désertification s'aggrave, l'environnement naturel souffre de la déforestation, de l'érosion des sols, de la dégradation des terres, de la pénurie d'eau, du déclin des écosystèmes et de l'assèchement des oueds. L'atmosphère en Algérie diffère d'une région à l'autre. Le climat est méditerranéen sur la côte nord et l'Atlas tellien (étés chauds et secs ; hivers frais et humides). Au-delà de l'Atlas saharien, le haut plateau est semi-aride et le désert du Sahara est situé au sud.

La sécheresse, un phénomène naturel, se caractérise par son apparition progressive, sa durée incertaine et ses impacts potentiels persistants même après la reprise des précipitations. Elle peut déclencher une cascade de phénomènes naturels, notamment des conséquences météorologiques (par exemple, l'érosion), agronomiques (par exemple, les mauvaises récoltes) et hydrologiques (par exemple, les pénuries d'eau). Ces déséquilibres, associés aux migrations forcées, au chômage, à la pauvreté et à la faim, peuvent même conduire à un nouveau type de sécheresse socio-économique. L'expansion de la désertification, la baisse de la qualité de l'eau, la désintégration des sols et la perte de végétation sont d'autres effets néfastes des périodes de sécheresse prolongées. Afin de caractériser un phénomène planétaire : la sécheresse, tendances récentes dans le monde entier sont explorées, en se concentrant spécifiquement sur la région du nord-ouest algérien. Cette région, fréquemment frappée par des sécheresses parfois graves principalement dues au changement climatique et à l'activité humaine dans divers secteurs, offre une occasion opportune d'analyser la sécheresse comme un défi transfrontalier qui touche toutes les nations. Les questions suivantes guident notre enquête :

- Quelle est la menace mondiale et régionale de la sécheresse, et quel est son impact sur le monde ?
- La gravité de la sécheresse augmente-t-elle ? Le changement climatique en est-il la cause ?
- Comment les pays peuvent-ils renforcer leur résilience à la sécheresse ?

III- 1. Etude de climat : cas de bassin versant d'Oued Lakhdar (Ex-Chouly)

Les études récentes ([Elouissi et al,2017](#) ; [Ouassanouan et al,2022](#) ; [Hachemaoui et al,2022](#) ; [Belalite et al,2022](#) ; [Gasc et al,2023](#) ; [Malpede et Percoco,2023](#)), montrent que les résultats indiquent que le climat des régions semi-arides, avec une faible disponibilité d'eau, favorise le début et l'accroissement

du phénomène de déplacement des particules solides en raison des variations climatiques qui se manifestent par une irrégularité des précipitations et une sécheresse qui s'est installée depuis plusieurs années. Le climat des régions semi-arides est généralement chaud et sec. Les précipitations limitées rendent la région sujette à la sécheresse et à la désertification. Les températures varient considérablement entre le jour et la nuit, les températures diurnes étant élevées et les températures nocturnes étant basses. Les plantes et les animaux qui vivent dans ces régions ont développé des adaptations pour survivre dans des conditions difficiles. Par exemple, les plantes ont des racines profondes pour atteindre les eaux souterraines, et les animaux disposent de mécanismes pour conserver l'eau. Les régions semi-arides sont importantes pour l'agriculture et l'élevage, mais sont menacées par le changement climatique et la surexploitation des ressources naturelles.

La station d'Ouargla détient le record de la température la plus chaude depuis 1949 (51,3 °C en juillet 2018). L'été le plus chaud (moyenne de 29,9 °C) s'est produit en 1966 dans toutes les stations situées à moins de 1 360 mètres (y compris les températures nocturnes, généralement autour de 28 °C). La journée la plus froide (-13,8°C) a été enregistrée à Mecheria (1150 mètres) en janvier 2005. L'hiver le plus froid (9,5°C en moyenne) s'est déroulé de janvier à mars. La température moyenne de l'Algérie a augmenté de 2,3°C au cours des trois derniers mois (11,8°C). Seules sept stations disposent de données continues sur la température de 1991 à 2022. Août 1999 a été le mois le plus chaud (31,4°C), tandis que janvier 2005 a été le plus froid (8,9°C). La température annuelle moyenne est passée de 19,8°C (1991) à 20,9°C (2022).

Les études sur les précipitations sont rares, seule l'Algérie occidentale étant documentée, Oran a connu une augmentation de la température de plus de 1,5°C (1926-2006) et une diminution des précipitations de 10 à 20 % (Tabet-aoul, 2008). Les précipitations quotidiennes les plus élevées (15,9 mm) ont eu lieu à Guelma en novembre 1988. La station portuaire de Jijel reçoit le plus de précipitations annuelles, tandis qu'Ain Salah est la plus sèche (Office national de la météorologie [\(ONM, 2023\)](#)). Des études récentes dans l'ouest de l'Algérie montrent une augmentation des sécheresses (1913-1938, 1987-2012) et une évolution vers un bioclimat semi-aride avec une période de sécheresse de 7 mois [\(Yahiaoui, 2015\)](#).

Pour analyser les tendances climatiques et les épisodes de sécheresse, des données ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) couvrant la période 1999 à 2021. Ces données comprennent :

- Cinq stations situées dans la zone d'étude ont enregistré des précipitations : Henaya, Chouly, Meurbah, Lala Seti et Tlemcen.
- Données météorologiques d'une station : Hammam Boughrara.

Les coordonnées de chaque station sont détaillées dans le tableau III- 1. La figure III-1 présente la localisation des stations qui fournissent les données.

Tableau III- 1 Coordonnées des six stations autour du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Station	Précipitation(mm)	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période
Hammam Bouhrara	256	01°38'20"W	34°53'23"N	225	1999-2021
Hennaya	383	'01°23'17"W	34°55'20"N	515	1999-2021
Chouly	420	01°8'5"W	34°51'52"N	722	1999-2021
Meurbah	425	01°10'19"W	34°44'46"N	875	1999-2021
Lalla Setti	457	'01°19'29"W	34°51'58"N	1 007	1999-2021
Tlemcen	542	'01°19'29"W	34°52'26"N	810	1999-2021

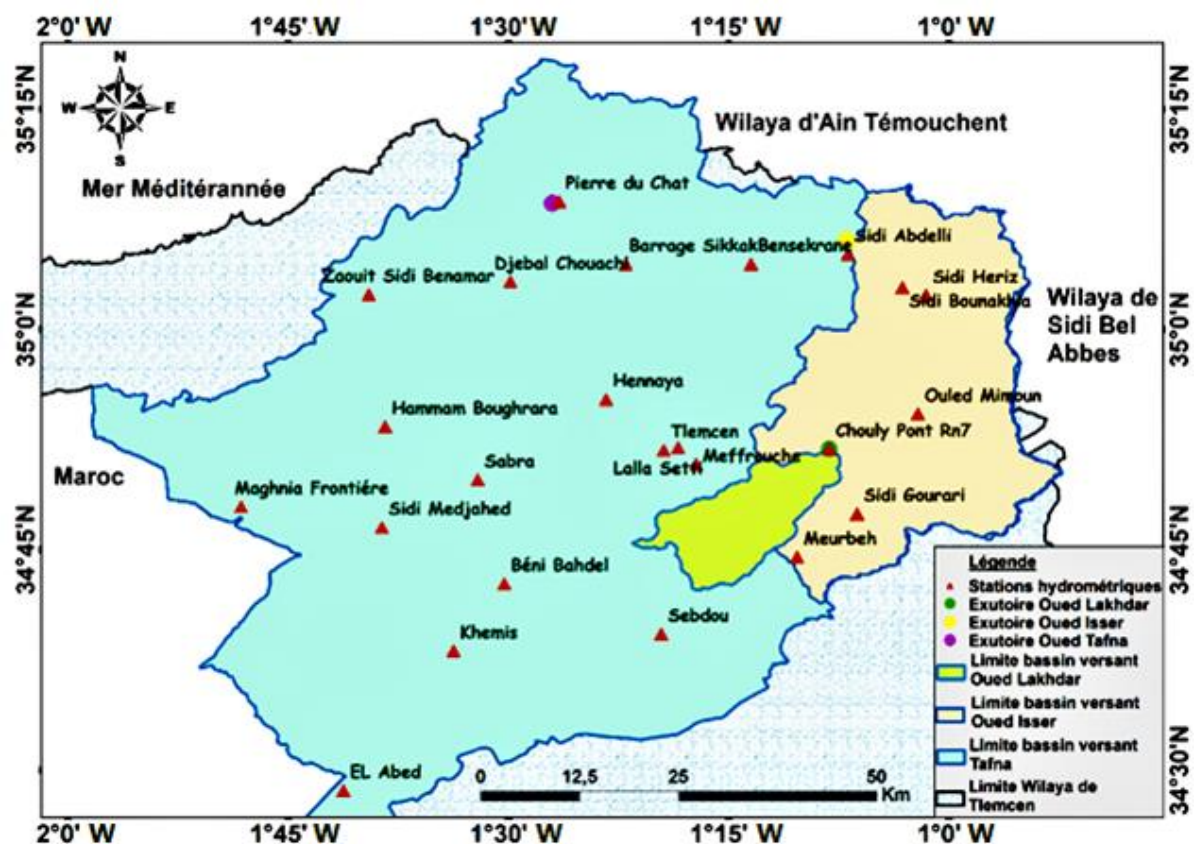


Figure III-1 Situation géographique des stations hydro-pluviométriques dans la région de la Tafna.

Le régime climatique du bassin versant de l'oued Lakhdar est semi-aride, avec des précipitations et des températures variables. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 420 mm. La température moyenne maximale est de 21 °C et la température moyenne minimale de 15 °C. Cela montre une différence de température de plus de 3 °C sur 23 ans (1999-2021).

Le changement climatique a été étudié à l'aide de données sur les jours de pluie, la température annuelle moyenne, les jours chauds (de 25 °C à 30 °C) et les jours très chauds (au-dessus de 30 °C) (tableau III-2). Les six ensembles de données sont complets et couvrent 23 ans.

Tableau III-2 Nombre de jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$).

Année	Nombre de jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$)	Nombre de jours de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$)
1998-1999	54	5
1999-2000	77	9
2000-2001	61	6
2001-2002	67	11
2002-2003	98	10
2003-2004	111	19
2004-2005	99	29
2005-2006	114	15
2006-2007	83	13
2007-2008	107	22
2008-2009	100	30
2009-2010	103	23
2010-2011	145	42
2011-2012	128	39
2012-2013	115	29
2013-2014	101	21
2014-2015	127	43
2015-2016	87	7
2016-2017	109	27
2017-2018	90	5
2018-2019	94	12
2019-2020	97	11
2020-2021	81	14
2021-2022	93	8

La température est importante pour le climat, avec les précipitations, elle nous permet de calculer le déficit d'écoulement et les indices climatiques. Le bassin versant de l'oued Lakhdar a un climat semi-aride avec deux saisons principales. Selon les informations de la station de Hammam Boughrara, il y a des mois plus froids que les autres tel que les mois de novembre, décembre, janvier, février avec une température moyenne de $16,4^{\circ}\text{C}$, contre une moyenne annuelle de $19,4^{\circ}\text{C}$. Le minimum de température est d'environ $9,8^{\circ}\text{C}$. Le semestre plus chaud et plus sec a une température maximale de $28,8^{\circ}\text{C}$ en août (tableau III-3). La zone d'étude connaît des vagues de chaleur, des sécheresses et des hivers froids et des étés chauds en raison du réchauffement climatique. Les minimales hivernales sont en moyenne de $4,1^{\circ}\text{C}$, tandis que les maximales estivales sont en moyenne de $29,1^{\circ}\text{C}$.

Tableau III- 3 Données de température annuelle maximale et minimale observées à la station de Hammam Boughrara (1999-2021).

Données	Max	Min	Moyenne
Température maximale (°C)	28,8	23,9	26,4
Température minimale (°C)	13,5	9,8	12,4
Température moyenne (°C)	21	15	19,4

L'infiltration, l'érosion, le ruissellement et le déplacement des particules solides sont influencés par la lithologie. On distingue les matériaux géologiques en formations meubles ou solides. L'hydrologie de surface est influencée par la nature des affleurements et le type de dépôt. Le bassin agricole d'Oued Lakhdar est principalement constitué de ces formations géologiques : dépôts marins du Miocène supérieur, dépôts continentaux du Pliocène, dépôts continentaux du Quaternaire, formations du Jurassique supérieur et moyen et alluvions récentes. La majeure partie du bassin versant d'Oued Lakhdar (1 961 hectares) est consacrée à l'agriculture, avec environ 140 hectares de vergers. Ces vergers contiennent diverses espèces comme les cerisiers, les oliviers, les figuiers, les amandiers, les abricotiers, les pommiers, les pêchers, les poiriers et les rosacées rustiques adaptées aux conditions difficiles. Les cerisiers sont particulièrement importants, reflétant une longue tradition où les habitants donnent la priorité à leur culture ([Gherissi et al, 2017](#)).

L'occupation du sol du bassin révèle une couverture forestière dégradée sur les zones à sol mince et à forte pente, variant de 23 à 41%. Malgré une réduction de 35% de la déforestation, les 4779 hectares de terres forestières restantes au sein du bassin versant sont essentiellement constitués d'une végétation arborée et arbustive sur les versants nord des massifs montagneux entourant la haute vallée de la zone d'étude. Au niveau du région d'étude, plus de 80% de la surface montagneuse intégrée au bassin est occupée par des forêts et des pâturages dégradés, reflétant la composition topographique des reliefs à orientation sylvo-pastorale. Les formations karstiques et calcaires-dolomitiques au sein de cette zone recèlent d'importantes ressources en eaux souterraines. On y trouve des forages, des sources et des exutoires d'eau naturels (émergences). Le bassin est caractérisé avant tout par de nombreuses émergences dues à deux facteurs : la dissection du massif en crêtes et rifts séparant des aquifères complètement déconnectés, et l'incision des vallées ([Chebbani et al, 1995](#) ; [Reolid et al, 2014](#) ; [Gherissi et al, 2017, 2021](#)).

La région d'étude se distingue par un climat semi-aride et des variations instables des précipitations et des températures. Dans ce bassin versant, les précipitations totales annuelles moyennes sont d'environ 420 mm. La température maximale moyenne est de 21 °C et la température minimale moyenne est de 15 °C avec une différence de température de plus de 3 °C sur 23 ans (de 1999 à 2021). De plus, nous fournissons des données sur le nombre de jours de pluie. La température annuelle moyenne et le nombre de jours de chaleur ($25\text{ °C} \leq T < 30\text{ °C}$) et de forte chaleur ($T \geq 30\text{ °C}$) ont été utilisés pour étudier le changement climatique dans l'étude. Les six ensembles de données sont bien représentés.

Aucun ensemble de données ne manque et la période de détection est de 23 ans. L'analyse des tendances des température annuelle à la station de Hammam Boughrara montre un légère augmentation avec un coefficient de corrélation de $r = 0,33$ et le nombre de jours chauds et très chauds a augmenté avec un coefficient de corrélation successif (0,33 et 0,12) et une canicule enregistrée en 2010-2011 avec 145 jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et 42 jours de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) au cours des 23 dernières années (Figure III-2a) et que les précipitations aux stations de Hennaya, Chouly et Meurbah ont légèrement diminué avec des coefficients de corrélation successivement faibles (0,03 ; 0,11 et 0,1) et les deux autres stations, Lala Seti et Tlemcen montrent une diminution significative des précipitations avec des coefficients de corrélation séquentiels légèrement plus forts (0,32 et 0,59). D'une manière générale, les nombres de jours pluvieux ont montré une diminution pour les cinq stations pluviométriques (Hennaya, Chouly, Meurbah, Lala Seti et Tlemcen) au cours des 23 dernières années (Figure III-2b). Cette diminution des précipitations et cette augmentation des températures ces dernières années sont dues aux changements climatiques aux niveaux global, régional et local.

La température joue un rôle important dans la détermination du climat. La variation des températures au cours de la période d'observation entre 1999-2021 montre un signe d'irrégularité d'une année à l'autre en raison des phénomènes de sécheresse et de changement climatique qui frappent la région nord-africaine. Les valeurs fournies à la station de Hammam Boughrara ont permis de distinguer un semestre inférieur à la moyenne annuelle égale à $19,4^{\circ}\text{C}$ s'étendant de novembre à avril et l'autre semestre sec et chaud avec une température maximale estimée à $28,8^{\circ}\text{C}$ enregistrée en août. L'analyse des variations interannuelles des températures entre 1999 et 2021 montre une tendance globale à la hausse ce qui signifie des vagues de chaleur. La pluviométrie observée à la station d'Oued Lakhdar met en évidence l'importance des variations pluviométriques pendant la période d'étude. La variation des chutes de pluie annuelles au cours de la période d'observation montre l'écart significatif entre les valeurs extrêmes un signe d'irrégularité. L'analyse des variations interannuelles des précipitations entre 1999 et 2021 montre une tendance globale à la baisse des apports pluviométriques. Les précipitations annuelles maximales ($P_{\text{max}} \text{ annuelles} = 701 \text{ mm}$) enregistrées en 2007-2008 dépassent la moyenne annuelle ($P_{\text{moy}} = 420 \text{ mm}$), signe d'une très grande irrégularité et de fortes variations des précipitations. Notons également que les précipitations moyennes annuelles minimales sont égales à 279 mm enregistrées en 2019-2020.

Parmi les causes de cette augmentation de température et de cette diminution des précipitations ces dernières années dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar on retrouve plusieurs facteurs tels que le changement climatique, la surexploitation des ressources naturelles et des terres agricoles alors que 80% des superficies étudiées sont des terres agricoles avec la présence de plusieurs forages destinés à l'irrigation. Les émissions de gaz à effet de serre proviennent de la zone industrielle qui se situe juste à côté de notre bassin versant. La déforestation et parmi les conséquences de cette augmentation de température et de cette diminution des précipitations on retrouve la sécheresse, la désertification et l'érosion menacent plusieurs millions d'hectares. Les sols sont sensibles à la sécheresse qui est causée par plusieurs facteurs dont le climat et la surexploitation des terres. Le problème de la sécheresse est

ancien puisque plusieurs civilisations ont disparu à cause de la surexploitation des ressources naturelles par l'homme. Le phénomène de sécheresse est très répandu en Algérie et il est inscrit dans le programme de développement durable. Les terres agricoles et les montagnes en Algérie sont vulnérables au phénomène de sécheresse et d'érosion hydrique et la biodiversité est largement perturbée. Études récentes ([Tramblay et al,2020](#) ; [Schilling et al,2020](#) ; [Vennetier, 2020](#) ; [Analy et Laftouhi, 2021](#) ; [Kourat et al,2022](#) ; [Ouassanouan et al,2022](#) ; [Malpede et Percoco, 2023](#)) montrent que le climat des zones semi-arides favorise le déclenchement et l'accélération du phénomène de sécheresse en raison des changements climatiques qui se traduisent par une diminution des précipitations et une augmentation des températures qui s'est instaurée ces dernières années. Le climat des régions semi-arides est généralement chaud et sec. Les précipitations limitées rendent la région sujette à la sécheresse et à la désertification. Les températures varient considérablement entre le jour et la nuit avec des températures affichant une tendance à la hausse. Les plantes et les animaux qui vivent dans ces régions ont développé des adaptations pour survivre dans des conditions difficiles. Par exemple les plantes ont des racines profondes pour atteindre les eaux souterraines et les animaux ont des mécanismes pour conserver l'eau. Les régions semi-arides sont importantes pour l'agriculture et l'élevage mais sont menacées par le changement climatique et la surexploitation des ressources naturelles.

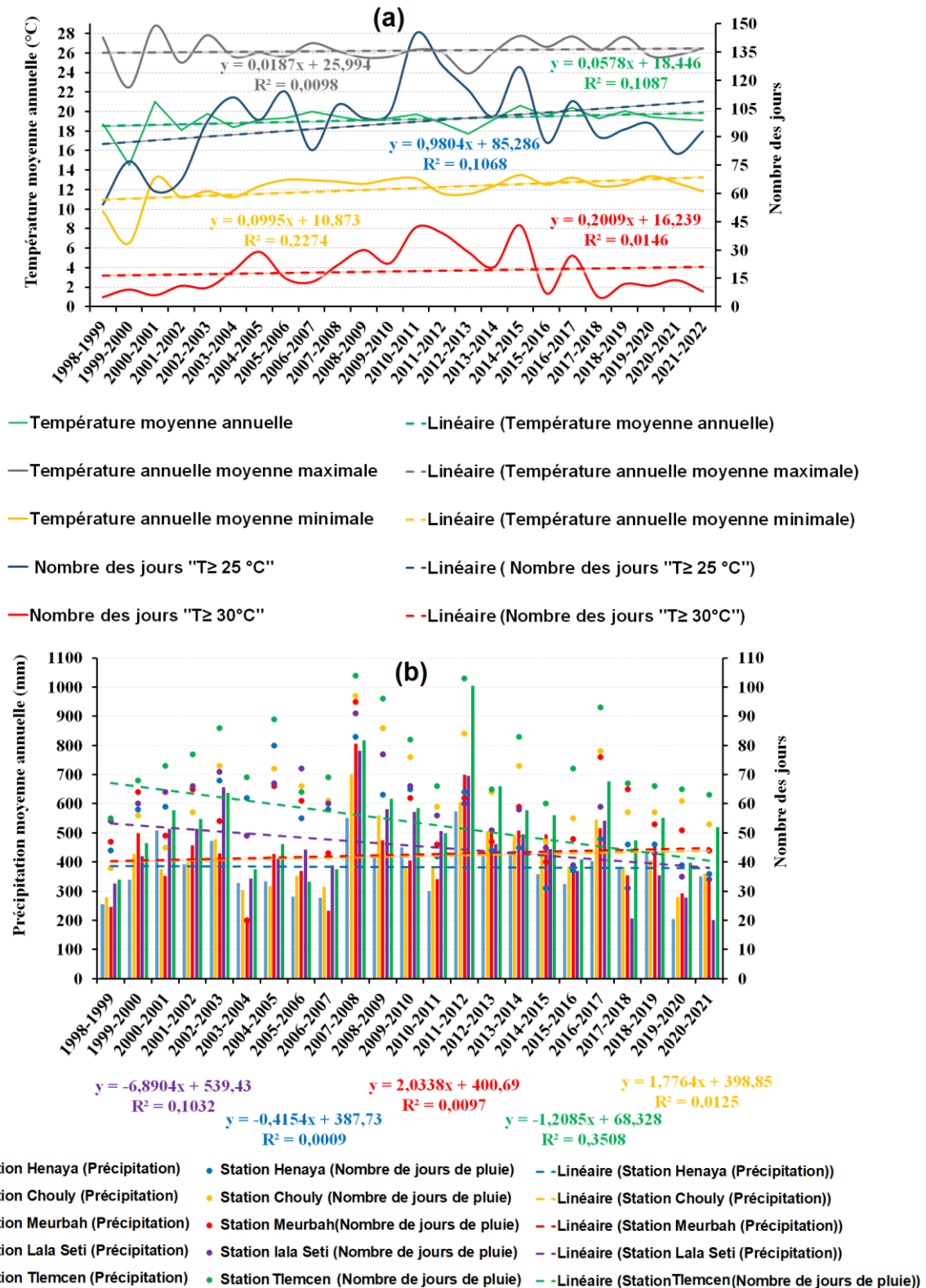


Figure III-2 Evolution moyenne annuelle des températures et des précipitations (1999- 2021) ; (a) Température (Moyenne, Maximum, Minimum) et nombre de jours de chaleur et de forte chaleur à la station de Hammam Boughrara ; (b) Précipitations et distribution du nombre de jours de pluie pour les cinq stations (Hennaya, Chouly, Meurbah, Lala Seti et Tlemcen).

III- 1.1. Analyses statistiques

III- 1.1.1. Tests statistiques et valeurs de p

Les valeurs de p sont utilisées pour évaluer les preuves contre une hypothèse nulle, qui est une affirmation selon laquelle il n'y a aucun effet ou relation entre les variables. La valeur de p représente la probabilité d'observer les données (ou quelque chose de plus extrême) si l'hypothèse nulle était vraie.

Un niveau de signification prédéfini (généralement 5 %) est choisi avant de procéder au test. Ce seuil indique la quantité de preuves nécessaires pour rejeter l'hypothèse nulle. Si la valeur de p calculée est inférieure au niveau de signification, nous rejetons l'hypothèse nulle. Inversement, nous ne rejetons pas l'hypothèse nulle si la valeur de p est supérieure ou égale au niveau de signification. En termes plus simples, une faible valeur de p (généralement inférieure à 5 %) suggère que les résultats observés ne sont probablement pas dus au hasard, ce qui renforce les preuves contre l'hypothèse nulle.

- $\alpha < 0,01$: résultat très significatif ;
- $\alpha < 0,05$: résultat significatif ;
- $\alpha > 0,05$: résultat non significatif.

Le niveau de signification indique la probabilité d'une erreur de type I, Qu'est-ce que cela signifie ? Si la valeur p est de 5 % et que l'hypothèse nulle est rejetée. La probabilité que l'hypothèse nulle soit de 5 %. Donc, il y a cinq possibilités de se tromper, Si la valeur critique diminue à 1 %. La probabilité d'erreur n'est donc que de 1 %. Mais l'hypothèse alternative est également plus difficile à confirmer. Calculez la valeur p. Tout d'abord nous devons trouver un test d'hypothèse approprié. Lorsqu'un test d'hypothèse approprié est trouvé. Vous pouvez calculer la valeur p. Les tests d'hypothèse les plus connus sont : Test T ; Analyse de corrélation ; Test du Chi carré ; Analyse de régression ; Test de Wilcoxon. Pour calculer une valeur p, nous avons besoin d'une fonction de distribution qui décrit le succès, ou d'un exemple de dessin. Si cette fonction de distribution est connue, vous pouvez déterminer la probabilité qu'un échantillon tiré soit inférieur ou égal à une certaine valeur. Des exemples classiques de ces distributions sont la distribution t et la distribution du Chi carré.

III- 2.1. Aperçu des données pluviométriques

III- 2.1.1. Analyse statistique

L'analyse des données de précipitations annuelles à long terme est cruciale pour cette étude. Les données pluviométriques de cinq stations entourant le bassin versant d'Oued Lakhdar pour la période 1999-2021 (23 ans) a été utilisé. Cette analyse se concentre sur les caractéristiques empiriques de cet échantillon, comme le montre le tableau III-4.

Tableau III-4 Caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles de cinq stations (1999-2021).

Station	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Hennaya	23	205,400	573,500	382,748	92,959
Chouly	23	279,100	701,100	420,170	107,710
Meurbah	23	197,900	805,700	425,096	139,730
Lala Seti	23	201,000	781,600	456,743	145,471
Tlemcen	23	332,000	1004,000	541,557	156,569

III- 2.1.2. Vérification de l'homogénéité de la série - Test de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon a été utilisé, adapté aux données qui ne nécessitent pas d'hypothèses sur la moyenne ou la variance, pour évaluer la qualité de nos séries de données. On commence par comparer deux séries annuelles de précipitations (Station Hennaya et Station Chouly ; Station Chouly et Station Tlemcen ; Station Meurbah et Station Lala Seti) de longueurs respectives $N^+ = 23$ valeurs et $N^- = 23$ valeurs ($N = N^+ + N^- = 23 + 23 = 46$). Le calcul de la statistique du test de Wilcoxon nous a donné les résultats suivants. Les résultats de la statistique du test de Wilcoxon sont présentés ci-dessous. Le logiciel XLSTAT 2016 a été utilisé avec un niveau de signification de 5% ($\alpha = 0,05$) pour le test bilatéral. Pour la comparaison de deux échantillons (Wilcoxon, Mann-Whitney) les conditions suivantes ont été assurées : Différence supposée (D) : 0. Niveau de signification (%) : 5. Valeur de p : valeur de p asymptotique. Traitement des égalités : Hollander & Wolfe. Correction de continuité : Oui. Statistiques descriptives entre Station Hennaya et Chouly (Tableau III- 5).

Tableau III- 5 (a) Test du signe et (b) Test de Wilcoxon.

Test des signes / Test bilatéral (a)	Test signé de Wilcoxon / Test bilatéral (b)		
N+	5	V	53
Hope	11,500	Hope	138,000
Variance (N+)	5,750	Variance (V)	1081,000
Valeur P (bilatéral)	0,011	Valeur P (bilatéral)	0,010
Alpha	0,05	Alpha	0,05

La valeur de p est calculée à l'aide d'une méthode exacte. H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution. H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes. Puisque la valeur de p

calculée est inférieure au seuil de signification $\alpha=0,05$. Nous devons rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative, H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est inférieur à 1,06%, (Tableau III-6). Une approximation a été utilisée pour calculer la valeur de p. H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution. H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes. Puisque la valeur de p calculée est inférieure au seuil de signification $\alpha=0,05$. Nous devons rejeter l'hypothèse nulle H_0 et retenir l'hypothèse alternative H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est inférieur à 1,02%. Une correction de continuité a été appliquée, (Figure III-3).

Tableau III-6 Résumé du test de Wilcoxon pour différentes stations.

Station	Variable/Test	Test de signe	Test signé de Wilcoxon
Hennaya/Chouly	V1	0,011	0,010
Tlemcen/Chouly	V1	< 0,0001	< 0,0001
Meurbah/Lala Seti	V1	0,832	0,284

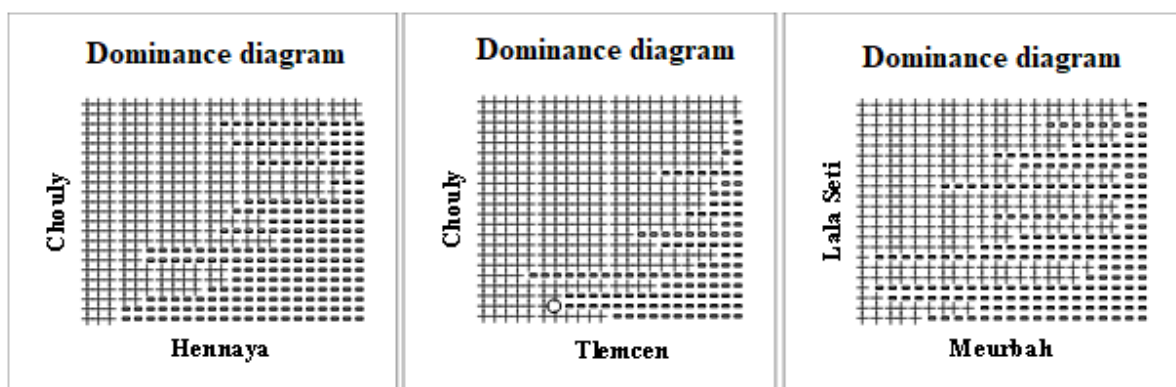


Figure III-3 Diagramme de dominance pour différentes stations.

On conclut donc que les cinq séries de précipitations annuelles de la zone d'étude sont homogènes.

III- 2.1.3. Calcul du paramètre de la loi choisie

Le logiciel XLSTAT 2016 a été utilisé pour ajuster la série de cinq précipitations à une distribution de probabilité en utilisant la méthode des moments à un niveau de signification de 5%.

III- 2.1.3.1. Adapté les données pluviométriques à la loi normale

L'adaptation graphique montre que la distribution normale s'adapte bien à notre échantillon de données. De la même manière nous avons appliqué le test du Chi-carré pour approuver ce résultat. Donc à un niveau de signification de 5% le test du Chi-carré montre clairement l'hypothèse que l'échantillon est issu de la distribution normale. Par conséquent, la série pluviométrique annuelle de la zone d'étude est ajustée par la loi normale. Ajustement d'une loi de probabilité. Niveau de signification (%) : 5. Distribution : Normale. Méthode d'estimation : Moments Ajustement d'une loi de probabilité (Hennaya) : H_0 : L'échantillon suit une loi Normale, H_a : L'échantillon ne suit pas une distribution Normale Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de niveau de signification $\alpha=0,05$. Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 lorsqu'elle est vraie est de 99,46%, le reste des stations se trouve dans le tableau III-7.

Tableau III-7 Ajustement des précipitations par une loi normale et application du test de Kolmogorov-Smirnov.

	Paramètre	Valeur		Paramètre	Valeur
	Station Hennaya	μ		382,748	Station Chouly
Sigma		92,959	Sigma	107,710	
Kolmogorov-Smirnov test			Kolmogorov-Smirnov test		
D		0,082	D	0,171	
Valeur p		0,995	Valeur p	0,458	
Alpha		0,05	Alpha	0,05	
Station Meurbah	Paramètre	Valeur	Station Lala Seti	Paramètre	Valeur
	μ	425,096		μ	456,743
	Sigma	139,730		Sigma	145,471
	Kolmogorov-Smirnov test			Kolmogorov-Smirnov test	
	D	0,169		D	0,085
	Valeur p	0,479		Valeur p	0,991
	Alpha	0,05	Alpha	0,05	
Station Tlemcen	Paramètre		Valeur		
	μ		541,557		
	Sigma		156,569		
	Kolmogorov-Smirnov test				
	D		0,130		
	Valeur p		0,787		
Alpha		0,05			

Tests de normalité : Résumé : p-value (bilatérale), (Tableau III-8).

Tableau III-8 Valeur P (bilatérale) des différentes stations.

Variable\Test	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
Valeur P (Hennaya)	0,977	0,968	0,900	0,823
Valeur P Chouly)	0,130	0,154	0,110	0,278
Valeur P (Meurbah)	0,162	0,208	0,072	0,230
Valeur P (Lala Seti)	0,982	0,936	0,858	0,785
Valeur P (Tlemcen)	0,063	0,201	0,525	0,051

Tests t et z sur un échantillon : H_0 : La différence entre les moyennes est égale à 0, H_a : La différence entre les moyennes est différente de 0. Sachant que la valeur de p calculée est inférieure au seuil de signification $\alpha=0,05$. Il faut rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et conserver l'hypothèse alternative, H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est inférieur à 0,01% (Tableau III-9).

Tableau III-9 Test t et z de différentes stations.

Variable\Test	Étudiant t et z
Hennaya	< 0,0001
Chouly	< 0,0001
Meurbah	< 0,0001
Lala Seti	< 0,0001
Tlemcen	< 0,0001

Estimation des quantiles (Figure III-4) :

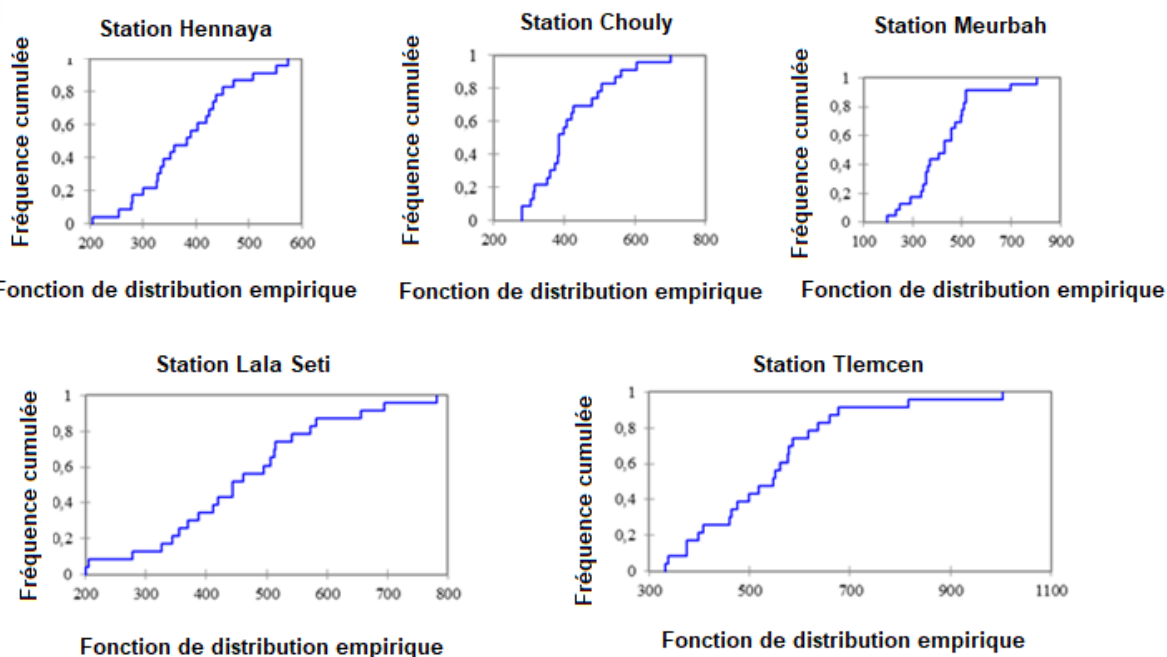


Figure III- 4 Estimation des quantiles pour différentes stations (1999-2021).

III- 3.2. Analyse des données de température et choix du type de loi d'ajustement

Ajustement d'une loi de probabilité (Tableau III-10) :

Tableau III-10 Test de Kolmogorov-Smirnov de la station Hammam Bouhrara.

Station Hammam Bouhrara	Paramètre	Valeur
	μ	19,169
	Sigma	1,240
	Kolmogorov-Smirnov test	
	D	0,212
	Valeur P	0,200
	Alpha	0,05

H_0 : L'échantillon suit une distribution normale. H_a : L'échantillon ne suit pas une distribution normale. Étant donné que la valeur de p calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 même si elle est vraie est de 20,04 %.

III- 3. L'agressivité climatique

D'après Office National des statistiques (ONS,2015) une étude faite par La Direction Générale des Forêts (DGF) à travers 34 bassins fluviaux, montrant que 13 millions d'hectares sont menacés par l'érosion hydrique. En Algérie, le phénomène de désertification s'aggrave de plus en plus, en effet, sur les 238 millions d'hectares de superficie, 200 millions d'hectares sont situés dans le Sahara, et 20 millions d'hectares sont dans la savane de basse altitude très fragile et sous le processus de désertification et le reste, près de 18 millions d'hectares, est constitué de montagnes, de plaines et de collines. La pluie est un facteur fondamental de l'érosion des sols, son intensité et sa durée ne sont pas les seuls paramètres qui régissent l'étendue de l'érosion, d'autres paramètres sont bien définis par la formule de (USLE), qui le montre assez clairement.

Ce phénomène se produit sous l'influence de nombreux facteurs complexes tels que : le vent, la pluie, les gens et les animaux, Sous l'action de divers facteurs, les particules de la couche superficielle du sol se détachent, provoquant une érosion. Après une longue saison sèche caractérisée par des températures élevées, les pluies ont provoqué la destruction des masses terrestres. Le ruissellement généré par ces pluies transporte des particules de sol meubles. La variation de l'agressivité climatique dans les stations de Heriz et Chouly dans le bassin versant d'Isser entre 1973 et 2001 est illustrée dans la figure III-5.

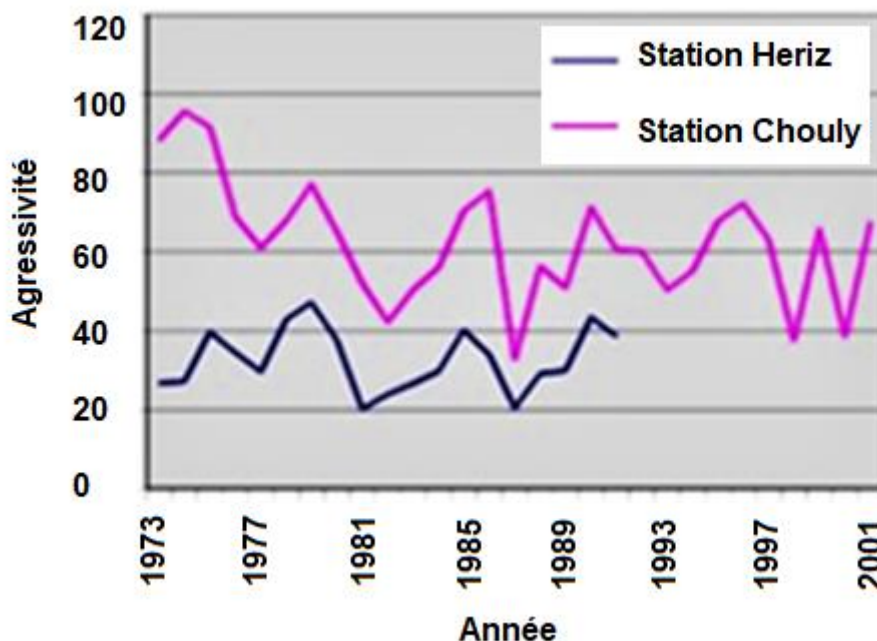


Figure III-5 Agressivité climatique dans les stations de Heriz et Chouly (1973-2001).

Le système bioclimatique méditerranéen semi-aride spécifique du Maghreb, caractérisé par un couvert végétal assez pauvre, une sécheresse estivale et une période pluvieuse s'étendant de novembre à février propice aux orages courts mais violents, favorise d'importants écoulements sédimentaires (Rodier et Roche, 1984). Depuis plus de 50 ans, plusieurs auteurs ont fait des estimations du transport solide en suspension (TSS) pour les grands oueds du Maghreb. Parmi les études les plus régulièrement citées nous trouvons celles de (Milliman et Meade, 1983 ; Walling, 1984). Ces études s'accordent sur la sensibilité du Maghreb à l'érosion hydrique, tout en proposant des valeurs globales de TSS spécifique variant de 10 t. km⁻².an⁻¹ à 5000 t. km⁻².an⁻¹, soit un rapport de 1 à 500, alors que d'après l'estimation de (Syvitski et al, 2003), le TSS spécifique serait en moyenne de 195 t.km⁻².an⁻¹ pour l'ensemble de la Terre.

De nombreux auteurs ont parlé du rôle positif de la pluie dans l'érosion des sols par l'eau. C'est l'énergie des gouttes de pluie qui provoque la séparation des particules. Ce phénomène a été démontré par Wischmeir aux Etats-Unis en 1960 ; Roose (1980). En Afrique de l'Ouest a constaté que l'énergie générée par la pluie est 256 fois supérieure à celle des eaux de ruissellement. Selon Heush (1970), l'énergie du ruissellement dans l'érosion est plus importante que celle des précipitations dans les régions méditerranéennes et semi-arides. En revanche, selon Meddi (1992) et Meddi et al (1998), l'efficacité des précipitations joue un rôle crucial dans l'explication de dégradation des terres dans les bassins versants d'Oued Mina et Beni Chougrane.

Le modèle RUSLE et le Système d'Information Géographique SIG ont été utilisés par Neggaz (2012) pour évaluer la résistance des sols à l'érosion hydrique dans la zone marneuse du bassin de l'oued Mina. L'objectif principal de l'étude, qui consiste à spatialiser le modèle ponctuel d'évaluation de l'érosion USLE, est de cartographier et de quantifier l'érosion hydrique, ainsi que d'identifier les sites d'industries et les sources de sédiments. Une version modifiée de RUSLE a utilisé l'équation (USLE) pour interagir avec le SIG. Les calculs découlent d'une modélisation des principaux éléments qui contribuent à l'érosion de l'eau. Maaliou et al (2014) ont traité une carte composite de l'indice d'érosion pluviale de deux grands bassins du nord de l'Algérie (les côtes d'Alger et de l'Isser). Cet indice caractéristique de l'équation (USLE) établi par Wischmeier à fournit des informations importantes sur l'érosion des sols par l'eau. Mokhtari (2018) pour évaluer l'érosion des sols par le modèle RUSLE utilisant la télédétection et le SIG dans le bassin versant Boussalem dans le nord-est de l'Algérie. Selon l'étude menée par Aouachria (2023) sur l'érosion hydrique dans la zone de l'Oued El-Arab, il a été démontré que le bassin est soumis à une érosion significative, ce qui entraîne un apport solide par fois considérable (556 t.km⁻².an⁻¹), ce qui met en péril la durabilité du barrage d'Oued El-Arab. La dégradation des terres et les sécheresses dans la région d'Ain Sefra ont été étudiées par Derdour et al (2023). L'étude montre que la zone d'étude est confrontée à une régression et une dégradation exacerbée par le changement climatique.

III- 3.1. L'effet de la sécheresse sur l'hydrologie et le transport solide

La sécheresse, entre autres phénomènes étroitement liés au changement climatique, touche de plus en plus les quatre coins du globe. Elle peut être définie comme un déséquilibre naturel temporaire de

la disponibilité en eau et comprend donc des précipitations persistantes inférieures à la normale, difficiles à prévoir, entraînant une diminution de la disponibilité en eau (Pereira et al, 2009). C'est l'une des catastrophes naturelles les plus coûteuses au monde, affectant plus de personnes que les autres types de catastrophes (Keyantash et Dracup, 2002). De nombreuses études ont porté sur la sécheresse en Méditerranée, sur la base d'une étude mondiale, Spinoni et al (2014), ont montré une hausse notable de la durée et de la gravité des sécheresses dans cette zone. La détection et la classification des sécheresses reposent sur divers indices établis qui relient les événements de sécheresse aux paramètres climatiques (Zeybekoglu et Akturk, 2021). Les méthodes les plus couramment utilisées pour évaluer les sécheresses météorologiques comprennent l'indice de précipitations standardisé (SPI) (McKee et al, 1993), l'indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé (SPEI) (Vicente-Serrano et al, 2010) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965). La recherche sur la sécheresse reste un domaine scientifique crucial, visant à atténuer ses effets dévastateurs et à mettre en œuvre des mesures préventives. De nombreux chercheurs dans le monde surveillent activement ce phénomène, comme en témoignent les études menées par (Danandeh mehr et al, 2022 ; Hrou et al, 2022 ; Isia et al, 2023 ; Goksu soydan oksa,2023 ; Simsek et al, 2023).

Les pays arabes, situés dans un climat essentiellement semi-aride à aride, dépendent fortement d'un secteur agricole pluvial, en particulier dans la région du Maghreb (Libye, Tunisie, Algérie, Maroc, Mauritanie). Ce secteur essentiel est très vulnérable aux fluctuations de la sécheresse. Lorsque les ressources en eau diminuent, les effets se propagent vers l'extérieur, affectant l'agriculture irriguée, l'approvisionnement en eau potable et d'autres secteurs gourmands en eau comme l'industrie, le tourisme, l'exploitation minière et les écosystèmes. La pression combinée de la pénurie d'eau et de la sécheresse met à rude épreuve la stabilité sociale, économique, financière et environnementale des nations arabes. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2023), la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) est la plus touchée. Le changement climatique aggrave une pénurie d'eau déjà préoccupante, l'activité humaine étant identifiée comme le principal responsable, 90 % des habitants des pays arabes pensent que la région souffre de stress hydrique, mettant en péril l'irrigation, l'activité économique et les besoins fondamentaux en eau potable. Cette situation va s'aggraver : en 1950, les ressources en eau renouvelables par habitant étaient quatre fois plus élevées qu'aujourd'hui. D'ici 2050, les ressources en eau naturelles de la région MENA devraient encore chuter, atteignant un niveau 11 fois inférieur à la moyenne mondiale. Les sécheresses fréquentes aggravent encore la situation, provoquant des pénuries d'eau, des difficultés économiques et sociales. Par exemple, la sécheresse de 2008-2011 à Djibouti a réduit son PIB de 3,9 % par an. Alors que 40 % des emplois arabes sont liés à l'agriculture, on prévoit une baisse de la production d'ici 2050 en raison de la diminution des précipitations et de la hausse des températures. Même un réchauffement de 1 à 2 °C pourrait mettre en danger 30 % des espèces fruitières et végétales et le changement climatique devrait coûter aux agriculteurs tunisiens 700 millions de dollars d'ici 2050 en raison de la réduction du ruissellement et de l'aggravation de la pénurie d'eau.

Le monde arabe détient le triste record d'être la région la plus pauvre en eau du monde, avec les plus fortes importations de produits alimentaires. Quatorze des vingt pays les plus confrontés au stress hydrique se trouvent dans cette région, où les ressources en eau ne représentent que 6 % des

précipitations annuelles moyennes, contre une moyenne mondiale de 38 %. La surexploitation des ressources naturelles a gravement dégradé les écosystèmes, et la mauvaise gestion des terres et de l'eau réduit encore davantage l'approvisionnement potentiel de ressources déjà limitées. Ces dernières années, on a assisté à une augmentation alarmante de l'intensité et de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment des incendies de forêt au Liban et en Syrie, des crues soudaines en Égypte, en Jordanie, à Oman et en Arabie saoudite, et des tempêtes de sable et de poussière qui sévissent en Syrie et en Irak, s'étendant aux pays voisins (*Lebdi et Maki, 2023*).

Une étude de *Giorgi et Lionello (2008)* sur les effets du changement climatique dans le bassin méditerranéen a révélé qu'une diminution marquée des précipitations est associée à un réchauffement marqué, principalement pendant l'été. De plus, *Giorgi et Lionello (2008)* suggèrent que la Méditerranée peut être une région très vulnérable aux changements globaux. Il est donc probable que la sécheresse affectera davantage cette zone. *Ghenim et Megnounif (2013)* ont examiné l'ampleur de la hausse de température dans la région Meffrouche. à l'instar de l'ensemble du Maghreb, qui souffre de la sécheresse depuis plusieurs décennies. Différentes approches utilisant des données pluviométriques et hydrologiques ont été utilisées dans cette étude pour clarifier la sévérité de cette sécheresse.

À l'échelle régionale, l'Algérie est confrontée à d'importantes préoccupations hydrologiques en raison de la sécheresse. Les ressources en eau de surface sont très sensibles au changement climatique. Au cours du siècle dernier, l'Algérie a connu plusieurs sécheresses, les plus extrêmes se produisant en 1910 et 1940, et les plus persistantes entre 1975-1980 et le début du 21^e siècle. Les études confirment une période plus humide de 1950 à 1975 par rapport à la moyenne à long terme, mais depuis 1977, une sécheresse importante et sans précédent a été observée (*OSS, 2009*).

L'Algérie, située dans la région méditerranéenne, est désignée comme l'un des 24 « points chauds » mondiaux les plus vulnérables au changement climatique par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (*GIEC, 2023*). Le pays est confronté à des événements météorologiques extrêmes récurrents tels que des inondations, des sécheresses, des vagues de chaleur et des incendies de forêt. Dans le contexte de la crise climatique, de plus en plus de régions d'Algérie, en particulier les zones du centre et du nord-ouest, sont menacées en raison des changements prévus dans les régimes de précipitations. Le changement climatique perturbant le cycle de l'eau constitue une menace importante pour l'agriculture, en particulier dans les grandes régions agricoles de l'Ouest qui devraient connaître des risques de sécheresse croissants. Plusieurs études (*Megnounif et Ghenim, 2011 ; Mhamed et al, 2022 ; Diaf et al, 2024 ; Rais et al, 2024 ; Dahmani et al, 2024*) mettent en évidence des sécheresses fréquentes dans les zones du nord de l'Algérie.

Le nord de l'Algérie a fait l'objet de diverses études sur les précipitations et/ou la sécheresse, cependant la plupart des étés ont été passés dans les régions du nord-ouest contrairement aux régions du nord-est où le phénomène est moins bien compris. Parmi ces études figure l'étude de (*Taibi et al, 2017 ; Zeroual et al, 2017*). Plusieurs études sur les précipitations en Algérie ont été réalisées depuis le siècle dernier, mais la plupart d'entre elles n'ont analysé que brièvement quelques stations sur la base de calculs moyens. Ce n'est qu'en 1946, grâce aux travaux de Seltzer sur le climat de l'Algérie, qu'une analyse détaillée des précipitations est établie.

Meddi et Humbert (2000), à partir d'une étude sur la sécheresse, notent que les déficits pluviométriques existent depuis 1970 et sont toujours présents aujourd'hui. Cette pénurie crée un grave problème social et économique en raison de la pression croissante sur les ressources en eau (alimentation en eau potable, irrigation, etc.). En Algérie, la sécheresse se situe principalement au niveau hydrologique et agricole. Les mieux notés, Au siècle dernier, l'Algérie a traversé de nombreuses périodes de sécheresses, dont les plus intenses ont été ressenties en 1910 et 1940 et plus persistant dans les années 1975-1980 ainsi qu'au début du siècle, là mesurer le débit d'eau dans certains barrages dans la période 1945-98, 1945-75 et 1976-98 montrent des contributions divisées par deux entre les périodes humides et sèches, donnant une idée de l'intensité de tout la sécheresse et la dégradation du climat en sont la cause finale.

La sécheresse sévit depuis deux décennies maintenant et est particulièrement sévère dans l'ouest du pays. Cette tendance est confirmée par de nombreuses études scientifiques, (Yebdri et al, 2007 ; Ghenim et Megnounif, 2011). Du Sud au Nord et d'Ouest en Est. La carte du déficit pluviométrique réalisée dans ce cadre montre que le Nord-Ouest algérien présente donc le déficit pluviométrique le plus important, (Figure III-6). Cette compilation bibliographique révèle l'importance du phénomène étudié et le niveau d'intérêt de la communauté scientifique pour la sécheresse, principalement les indicateurs de sécheresse comme facteurs essentiels de gestion de la sécheresse. Les risques de sécheresse ainsi que la préparation et l'élaboration de plans d'intervention pour réduire l'impact potentiel de la sécheresse ont retenu l'attention de plusieurs chercheurs.

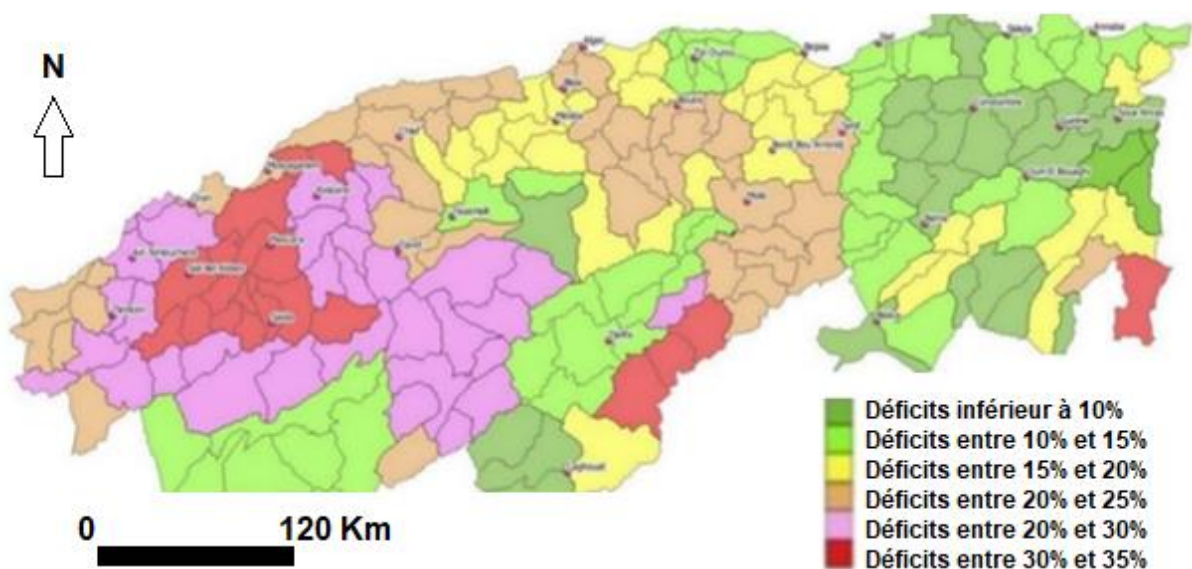


Figure III-6 Carte des déficits pluviométriques au Nord d'Algérie (ANRH 2017).

La partie de l'Algérie la plus dépendante des précipitations ne représente que 13% de la superficie totale du pays. C'est aussi l'endroit où la densité de population est la plus élevée, où concentrer les meilleurs sols, sources d'eau renouvelables, animaux et plantes le meilleur du pays. C'est dans ce domaine que les activités économiques hors hydrocarbures et les infrastructures les plus élémentaires importants. Il se trouve également sur cette bande nord, qui s'étend du Maroc à la Tunisie et bordée par la mer Méditerranée au nord et une isobathe de 200 mm au sud, on observe différents types de sécheresse. Il

existe donc une certaine disparité d'ouest en est et du nord au sud. Le bord côtier sur lequel s'arrête Tell Atlas est au sud, et là largeur de 100 à 150 km, est la zone la plus humide, avec une augmentation la moyenne annuelle d'ouest en est (de 400 à plus de 1000 mm/an) entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien se trouve une bande de 300 à 350 km de large contenant plaines riches en céréales, steppe pastorale présaharienne. Les précipitations varient de 100 à 400 mm et la sensibilité à La désertification est particulièrement grave. Le seuil de rareté théorique fixé par la Banque Mondiale est de 1000 m³/personne et plaçant chaque année l'Algérie parmi les pays les plus pauvres en termes de potentiel en eau. La disponibilité théorique en eau de 1500 m³/hab/an en 1962 est tombé sous le seuil théorique de rareté dans les années 1990 et n'est de 430 m³ en 2020. Cette quantité d'eau est réduite à l'eau mobilisée diminuera encore ([WBG, 2021](#)).

Pour atteindre une sécurité alimentaire satisfaisante, 15 à 20 milliards de m³/an dont 70% pour l'agriculture soit 3 à 4 fois plus mobilisés actuelle (5 milliards de m³ d'eau/an). Cette rareté des ressources est exacerbée de manière cyclique par sécheresse. Cela impliquerait entre différents utilisateurs du conflit graves qui nécessiteront certainement des arbitrages difficiles pour pouvoirs publics, notamment la nécessité de fournir de l'eau potable (AEP) sera multiplié par 2,5 environ en vingt-cinq ans et représentera en réalité 40 ressources peuvent être mobilisées vers 2025.

Le Sahara, qui couvre 87% du pays, est une région particulièrement aride et peu affectée par les précipitations, sauf pour les massifs du Hoggar et du Tassili où de rares pluies sont provoquées par la montée du front de convergence intertropicale pendant la saison des pluies (8 juillet) nourrissant parfois des sacs l'eau des blocs volcaniques granitiques et des couches de coulées infernales est utile pour population ([Zitoun, 2019](#)) en provoquant quelques années d'inondations fréquentes destructeur. L'ensemble de l'Algérie et plus précisément le Sahara connu cependant dans la période. Les canicules estivales et les vagues de chaleur sont importantes en intensité et en durée. L'été 2018 a été l'année des températures record dans le monde.

En Algérie, des températures maximales allant jusqu'à 60 degrés Celsius ont été observées à In Salah et Adrar. Cette canicule mondiale a des conséquences négatives pour la santé humaine et animale et provoquer des effets indésirables tels que les prix des céréales ont grimpé en flèche sur le marché mondial en raison d'une chute augmentation de la production sous l'effet de la sécheresse, ([Faci et al, 2016](#)).

Au niveau régional, les études spécifiquement axées sur la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar sont rares. La plupart des études sur la sécheresse en Algérie utilisent principalement l'indice de précipitations standardisé (SPI), négligeant l'influence de la température, par exemple, [Gherissi et al, \(2021\)](#) ont évalué l'impact hydrologique de la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar sur 44 ans en utilisant l'SPI, l'indice d'écoulement standardisé (SSFI) et l'IP et le coefficient d'hydraulicité. Leur analyse de 1970 à 2014 a identifié les fréquences des périodes humides et sèches, ainsi que les débits excédentaires et déficitaires. L'étude a révélé hausse des intempérés (2008-2014), après des décennies de déficit dans les années 1980, 1990 et 2000. Cette période (1982-2008) a également connu une diminution des précipitations et une augmentation des températures ([Gherissi et al, 2021](#)). Les actions humaines dans la région d'étude contribuent davantage à la sécheresse au fil du

temps. La déforestation a transformé les 4 779 hectares de terres forestières du bassin versant en une végétation à prédominance d'arbres et d'arbustes sur les pentes nord. Ces terres sont utilisées pour le pâturage toute l'année, ce qui entraîne un surpâturage et ses conséquences néfastes sur les sols, notamment la sécheresse et l'érosion (*Reolid et al,2014 ; Gherissi et al, 2021*).

III- 3.2. Le phénomène de sécheresse

La sécheresse peut être définie comme un phénomène naturel causé principalement par le manque de précipitations, ainsi que d'autres facteurs climatiques (température élevée, vent fort, faible humidité, etc.), cause, s'il est au fil du temps, réduisant le ruissellement des sources d'eau et humidité du sol et renouvellement insuffisant des aquifères. Ce phénomène amplifié par les actions humaines néfastes sur l'environnement (déforestation, émissions nocives, pression de l'élevage sur les prairies, surexploitation des ressources naturelles « eau et terre », etc.). Cela a un impact négatif, parfois dans de véritables catastrophes naturelles, sur l'alimentation humaine, l'élevage et la production agricole. Dès lors, la sécheresse n'est pas seulement météorologique mais aussi hydrologique en termes de remplissage des barrages et de régénération des nappes phréatiques, agricole en termes de production agricole et d'élevage, environnementale en termes de destruction de l'équilibre naturel ou encore socio-économique lorsqu'il y a un impact négatif sur les facteurs de production et la vie humaine (*Zitoun,2019*).

Pourquoi est-il important de surveiller la sécheresse ? Il s'agit d'un phénomène normal qui peut se produire dans n'importe quelle zone climatique du monde, y compris les déserts et les forêts tropicales. La sécheresse se classe chaque année parmi les aléas naturels les plus coûteux ; ils ont des conséquences importantes et de grande envergure, et affectent un nombreux secteur économique, population nombreuse. Les zones touchées sont souvent plus vastes que dans le cas d'autres phénomènes, comme le fait d'être confinées aux plaines inondables, aux zones côtières, aux trajectoires des tempêtes ou aux zones de failles, peut-être que les aléas naturels permettent le meilleur suivi en raison du phénomène.

III- 3.2.1. Types de sécheresse

Il existe donc plusieurs types de sécheresse (Figure III-7) :

III- 3.2.1.1. Sécheresse météorologique

L'instabilité météorologique est une sécheresse qui survient lorsque les précipitations sont plus faibles que d'habitude pendant une longue période. Il est surveillé par le service météorologique national. Les outils sont principalement : un réseau national de mesure des paramètres climatiques, observation et analyse d'images satellitaires spécialisées.

III- 3.2.1.2. Sécheresse agricole

La sécheresse agricole est un type de sécheresse qui survient lorsque la température est basse l'humidité du sol, combinée à la rareté de l'eau, le rabougrissement des plantes, réduire la production et mettre en danger le bétail. Ce domaine est sous la responsabilité des services centraux et déconcentrés de l'agriculture, des forêts, de l'élevage, les agriculteurs, les services environnementaux et la société civile.

III- 3.2.1.3. Sécheresse hydraulique

La sécheresse hydrologique est un type de sécheresse qui survient lorsqu'une sécheresse météorologique prolongée réduit considérablement le niveau de eaux souterraines, rivières et lacs. Son suivi relève des services d'irrigation (central et wilaya) dont la tâche principale est de fournir de l'eau aux populations, l'agriculture, le tourisme et l'industrie, les données de ruissellement d'eau de surface, apports de barrage, dynamique de l'eau sous terre, la croissance des sols irrigués collectés par le réseau des équipements de mesure ou par des observateurs répartis sur tout le territoire national.

III- 3.2.1.4. Sécheresse socio-économique

Sécheresse socio-économique, y compris les impacts économiques et sociaux formes antérieures (migration rurale, famine, réduction de la production agriculture, perte de bétail, augmentation des prix des matières premières nécessité, problèmes de santé humaine et animale, etc.). Ce formulaire les transactions de haut niveau (gouvernement) génèrent, selon leur gravité, campagnes de sensibilisation du public, la mise en place d'un fonds de soutien et d'indemnisation ainsi que lancer des actions de solidarité nationale et internationale. Sécheresse par conséquent, socio-économique est une forme de choc d'offre interne, c'est-à-dire une perturbation grave causée par des événements indépendants de la volonté de pays, et a une influence importante sur les variables économiques nationales.



Figure III-7 Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts (NDMC, 2005).

III- 3.3. Causes de la sécheresse

On sait que la formation des précipitations nécessite la présence de plusieurs conditions telles que la vapeur d'eau (humidité), la condensation des noyaux, et un système de recirculation qui permet et favorise la condensation et donc la formation de nuages et de précipités. Généralement, la sécheresse survient en l'absence de l'une de ces conditions. Mais il y a des détails qui ne sont pas toujours loin de ces conditions. Pour cela, il existe un certain nombre de travaux et d'études réalisés en l'Algérie, des études antérieures (Medjerab et Henia, 2005) ont montré que les sécheresses observées au cours des 20 dernières années, notamment dans la région ouest, sont également influencées par le phénomène ENSO. Durant cette période, le phénomène EL NINO est plus fréquent qu'avant, il a été observé plus de 5 fois depuis le début des années 1970. Budyko, (1977) a énuméré l'influence humaine dans ses activités industrielles et agricoles. L'impact humain sur le couvert végétal peut altérer les propriétés du sol (humidité du sol, rugosité, etc.). Au fur et à mesure que l'expansion des surfaces irriguées se développe avec la croissance démographique, l'équilibre hydrologique est modifié. De plus, il y a un changement d'albédo dû aux activités agricoles.

III- 3.4. Conséquences de la sécheresse

La sécheresse a un impact profond. Elle affecte nos vies en exerçant une pression sur les approvisionnements en eau, dégrade l'environnement et la santé humaine en raison de la mauvaise qualité de l'eau, accélère l'érosion des sols et nuit à l'économie en raison de la mauvaise qualité de l'eau et réduit la productivité agricole.

- Les conséquences sur les ressources en eau :

- La réduction des apports aux barrages et aux lacs entraînera réduction des réserves d'eau dans les réservoirs naturels (lacs) et artificiel (barrage) et perturber la distribution de l'eau entrante périmètre d'agglomération et d'irrigation ;
- Le manque de précipitations réduira le taux de renouvellement des nappes phréatiques et conduisent à la surexploitation et/ou surexploitation des eaux souterraines ;
- Pénurie de la demande en eau causée par deux points faisait auparavant face à une augmentation de la demande agricole et AEP/AEI mettra plus de pression sur le secteur minier aquifères renouvelables ou non renouvelables (fossiles) ;
- Détérioration de la qualité de l'eau due à la détérioration La dilution des polluants va amplifier la pollution de la réserve eaux de surface et eaux souterraines ;
- Perturbation de la distribution d'eau et pénuries fréquentes nécessite des compromis entre les groupes de consommateurs et véhicule de livraison mobile.

- Les conséquences sur l'agriculture, les forêts et la biodiversité :

- Les déficits pluviométriques saisonniers associés à la rareté de l'eau et à la hausse des températures : réduire l'humidité du sol, entrave la croissance des plantes, réduction de la productivité des cultures et du bétail, dangereux pour le bétail ;
- Vulnérabilité des arbres, massifs forestiers, maquis et Prairie va : mettre l'accent sur les incendies de forêt, l'érosion éolienne et sédiments éoliens, affecter la biodiversité de la flore et de la faune par la migration des populations fauniques et l'extinction des certaines espèces, affecte certains types de criquets transfrontaliers, en activant processus d'agrégation, après réduction la quantité de verdure (invasion 2004-2005), ainsi que l'attention des criquets sur ce qui reste. Après avoir complètement manqué de nourriture, la sauterelle quitter la zone pour chercher d'autres choses favorables sous forme d'essaims, soutenir l'expansion de la zone d'habitat, en particulier les criquets ont besoin d'une faible humidité, dans les zones peut devenir un vivier en raison de sécheresses à répétition, sensibilité accrue des animaux sauvages et domestiques aux maladies conventionnel ou nouveau créé par la migration, provoquant la malnutrition chez les animaux et les humains.

- Les conséquences sur la santé :

- La population perd de l'eau et la maladie survient ;
- Apparition de maladies dues à la malnutrition et autres effets ;

- Augmentation des maladies respiratoires et cardiovasculaires (ex : allergies, hypertension artérielle) ;
- Le problème de l'invasion biologique ;
- Risque accru de serpents, scorpions, animaux et insectes ;
- Risque accru de nouvelles maladies dues à migration de vecteurs et d'agents pathogènes ;
- Augmentation des troubles mentaux (par exemple : dépression, suicide) ;
- Troubles sociaux et conflits liés aux ressources naturelles (eau et nourriture) ;
- Population migrante et augmentation des réfugiés climatiques.

- Les conséquences sur le secteur industriel et économie :

- La production industrielle et d'autres secteurs économiques continuent de baisser interruptions de l'approvisionnement en eau et en énergie.

Des nombreuses publications scientifiques sur la région de Nord Algérie ([Boughalem,2013](#) ; [Derdour et al 2022,2023](#)) montrent que les zones à risque élevé de sécheresse se situent dans l'Oranie (Figure III-8).

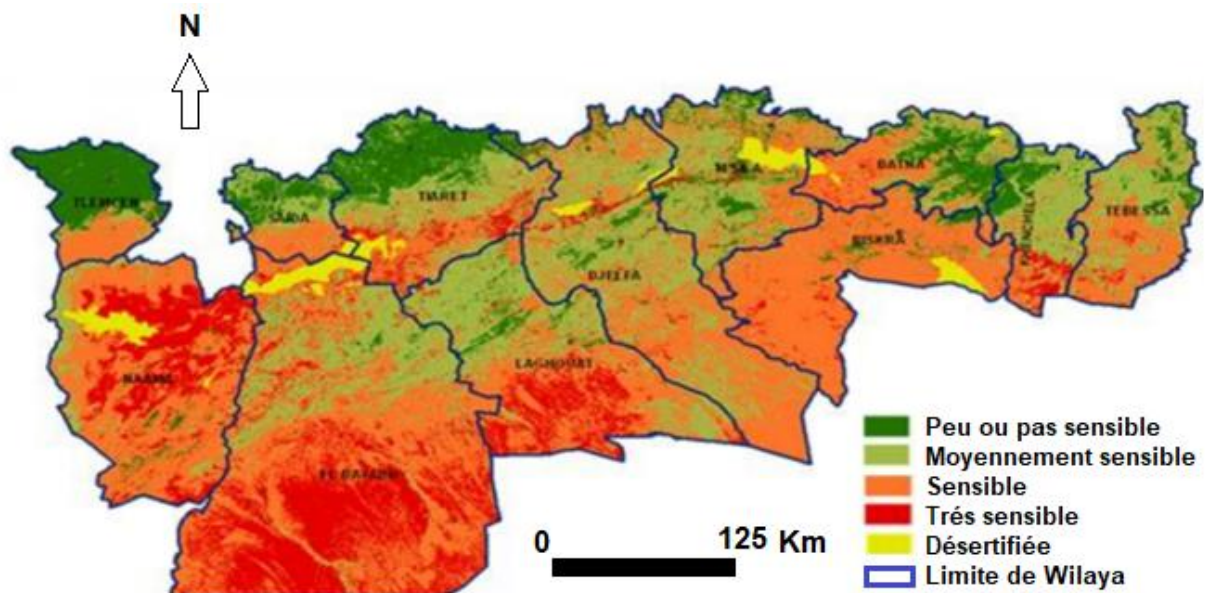


Figure III-8 Carte de la sensibilité à la sécheresse ([ASAL, 2012](#)).

III- 3.5. Les indices de sécheresse

Il est important de définir la signification des indicateurs de sécheresse et des indices de sécheresse. Les indicateurs sont des variables ou des paramètres utilisés pour décrire les conditions de sécheresse. Les exemples incluent les précipitations, la température, le ruissellement, les niveaux et les réservoirs des eaux souterraines, l'humidité du sol, la neige et la glace. Les indices sont généralement des représentations numériques de l'intensité de la sécheresse, calculées à partir de valeurs climatologiques ou hydrométéorologiques, y compris les indicateurs susmentionnés. Ils mesurent l'état qualitatif de la sécheresse à un endroit donné pendant une certaine période de temps. Les principales

caractéristiques d'un indicateur au regard de la quantification l'information pour en améliorer le sens et simplifier l'information pour améliorer sa popularité (OSS, 2003). Les indicateurs peuvent être classés en deux catégories (FAO, 1996) :

- Les index locaux sont basés sur des données ponctuelles et prennent ensuite un sentiment de "témoin représentatif" des situations locales (climat, ressources en eau, utilisation des terres et de l'eau, etc.) en quantité et qualité ;
- Indicateurs mondiaux basés sur des données macro et statistiquement significatives au niveau de l'unité administrative (pays, région, wilaya ou urbain) ou naturelles (bassin versant, aquifère régions, zones agro-écologiques) ;

Les indices les plus connus au niveau international sont climatiques :

- Le pourcentage par rapport à la normale ;
- La méthode des déciles ;
- L'Indice de Sévérité de la Sécheresse de Palmer (PDSI) ;
- L'Indice de la Disponibilité Hydrique de Surface (SWSI) ;
- L'Indice Normalisé des Précipitations (SPI) ;
- L'Indice Hydrique des Cultures (CMI) ;
- L'Indice national des Précipitations (RI) ;
- L'indice des Pluies Fiables (DR).

Un nouvel indicateur de sécheresse spécifique aux régions méditerranéennes connu sous le nom de « Indice standardisé de sécheresse pluviométrique » (ISSP) a été testé ces dernières années dans le bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne) (l'Association Internationale de Climatologie). Cet indicateur a deux objectifs principaux :

- D'une part, l'accessibilité des données de base et la facilité des calculs, afin qu'ils puissent être utilisés fréquemment pour le suivi Sécheresse ;
- D'autre part, il peut être le plus adapté possible au climat Méditerranée, où la sécheresse de longue durée.

A ces indicateurs climatiques de base, on peut ajouter « l'Indice régularisation de l'r » permet d'évaluer la sécurité de l'approvisionnement annuel dans l'eau en mesurant une partie du débit de surface naturel théorique effectivement et régulièrement disponibles. La plupart des indicateurs mentionnés ci-dessus sont globaux et donc spécifiques territoire immatriculé ou dans les limites administratives (wilaya, commune) ou dans des limites naturelles (bassins, zones écologiques ou topographie minière). En région Maghrébin, il est préférable d'utiliser les indicateurs sélectionnés dans l'atelier Maghreb sur la sécheresse à Rabat (2006), à savoir : niveau d'humidité standardisé (SPI) ; évaluation de la Végétation (NDVI) ; évaluation des eaux de surface (SWSI). En plus de ces indicateurs, il a été convenu de tester l'indice ISSP pour son applicabilité aux conditions climatiques méditerranéennes.

Plusieurs types des indices sont utilisées tel que :

- Indicateurs de type de météorologique (KBDI, SPI, CZI, DRI, RDI, EDI, PDSI, SPEI, ...,) ;

- Indicateurs de type d'humidité de sol (SMA,ETDI,SMDI,SWS) ;
- Indicateurs de type hydrologique (PHDI,SDI,SRSI,SSF,SWI,...) ;
- Indicateurs de type de télédétection (ESI,EVI,NDWI,NDVI,...) ;
- Indicateurs de type valeurs composites ou modélisées (CDI,MSDI,USDM,...) ; (OMM et GWP, 2016).

III-4. Impact du changement climatique sur la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar

Cette partie de chapitre vise à démontrer l'existence de la sécheresse dans le bassin versant d'Oued Lakhdar et à sensibiliser à ses implications sectorielles régionales. Notre objectif est d'explorer des solutions résilientes et adaptatives à la sécheresse à l'échelle mondiale. En outre, cette étude vise à combler les lacunes de la recherche liées aux phénomènes de sécheresse dans le bassin versant d'Oued Lakhdar, contribuant ainsi au partage des connaissances régionales sur les problèmes de sécheresse. Les indices (SPI), (SPEI) et (PDSI) a été utilisés. Cette approche globale comblera les lacunes critiques de la recherche scientifique sur la sécheresse dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Le bassin versant de l'Oued Lakhdar, situé au nord-ouest de l'Algérie, relève du code 16 du schéma hydrographique de l'Agence nationale des ressources hydrologiques (ANRH). Ses coordonnées géographiques s'échelonnent de 34,70° à 34,86° Nord et de 1,09° à 1,3° Ouest. Le climat est classé comme semi-aride, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 420 mm (1999-2021).

Le bassin versant est bordé par le bassin versant de la Meffrouche au sud, celui de l'oued Isser à l'est et celui du Sikkak à l'ouest. Il couvre une superficie de 170 km² avec un périmètre de 70 km, selon l'ANRH. Les altitudes maximale, minimale et moyenne au sein du bassin versant sont respectivement de 1606 m, 722 m et 1130 m. Le creux principal de la vallée a une longueur de 30 km.

Cette partie d'étude a utilisé trois indices de sécheresse : l'indice normalisé de précipitations (SPI), l'indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI). Ces trois indices ont une caractéristique commune : ils sont calculés à l'aide de données mensuelles sur les précipitations et les températures recueillies sur une période de 23 ans. Plus précisément, le SPI-12, le SPEI-12 et le PDSI-12 a été choisi, qui représentent les anomalies de précipitations au cours des 12 derniers mois. Cette période est couramment utilisée pour évaluer les conditions de sécheresse à long terme, car elle prend en compte les effets cumulatifs des déficits de précipitations sur une période prolongée.

III- 4.1. Indice de précipitation standard (SPI)

Le SPI est déterminé en se basant sur les précipitations mensuelles moyennes (mm. Jour⁻¹), qui ont une durée variable (n=1, 2, 3, 6, 9,12 et 24 mois). On effectué le calcul des divers SPI en utilisant un programme dans R-studio. Le SPI d'un endroit spécifique pour une période sélectionnée, basée sur les

observations à long terme des précipitations, est déterminé par l'adaptation d'une fonction de probabilité adaptée à la répartition fréquente des précipitations sur la durée considérée (habituellement 3, 6, 9, 12 et 24 mois). Cela est réalisé de manière distincte pour chaque échelle temporelle et pour chaque position dans l'espace (Angelidis et al, 2012).

L'SPI, développé par McKee et al, (1993), vise à améliorer la détection, la surveillance et la quantification des déficits de précipitations en utilisant des probabilités de précipitations sur différentes échelles de temps. Les points forts de l'SPI sont sa simplicité, sa flexibilité et sa capacité à analyser les sécheresses sur différentes échelles de temps, Cependant, il a des limites : il ne considère que les précipitations comme un facteur pour un phénomène complexe comme la sécheresse (Zarch et al, 2015). Le calcul du SPI est présenté dans l'équation (III-1) :

$$SPI = \frac{x_{i,j} - \bar{x}}{\sigma} \quad (III-1)$$

Où, $x_{(I,J)}$ = précipitations saisonnières ; \bar{x} = La mesure saisonnière moyenne à long terme ; σ = écart type ; SPI = Indice de précipitation standardisé.

III-4.2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

La méthode de calcul du SPEI est identique à celle du SPI, ce qui signifie qu'il est aussi normalisé et peut être effectué à diverses échelles temporelles. L'écart majeur entre ces deux mesures est que le SPI est déterminé exclusivement en fonction des précipitations, tandis que le SPEI repose sur la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Par la suite, à une valeur totale de (P-ETP) sur une période de n mois, on modifie la loi log-logistic en trois paramètres. Un test de Kolmogorov Smirnov (Vicente-Serrano et al, 2010) a validé la modification de la loi sur le calcul du SPEI.

Vicente-Serrano et al, (2010) ont introduit une méthode standardisée pour le SPEI, un indice de sécheresse basé à la fois sur les précipitations et la température. Le SPEI est calculé en tenant compte du bilan hydrique climatique, L'équation (2) est utilisée pour calculer une valeur (D). Cette valeur D est ensuite normalisée à l'aide d'une distribution logistique à trois paramètres pour obtenir le SPEI.

Il n'y a pas de différence significative dans les calculs entre le SPEI et le SPI. Ils partagent les mêmes propriétés d'indice. La principale différence réside dans les données et la distribution utilisées. Le SPEI intègre l'évapotranspiration, que Thornthwaite valorisait beaucoup, et une distribution logistique, jugée plus simple et plus cohérente, en particulier pour les valeurs (D) très faibles (équation III-2).

$$D = P - PET \quad (III-2)$$

Dans l'équation (III-2), P représente les précipitations mensuelles (mm) et PET représente l'évapotranspiration mensuelle (mm). Bien que SPEI propose diverses méthodes pour calculer PET, la méthode Hargreaves s'est avérée l'option la plus appropriée en raison de sa cohérence et de ses

exigences minimales en matière de données. La méthode Hargreaves, décrite par Hargreaves (1994), relie l'évaporation et la transpiration en utilisant uniquement des données de température minimale et maximale (*Hargreaves et Samani, 1985 ; Beguería et al, 2014*).

III- 4.3. Indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI)

Le PDSI, créé par *Palmer* au milieu des années 1960, qui a été l'une des premières expériences d'intégration de facteurs autres que les précipitations dans l'évaluation de la sécheresse. L'objectif de Palmer était d'inclure les informations sur la température et les pluies dans le bilan hydrique régional. À la différence du SPI et du SPEI, le PDSI ne se limite pas aux précipitations, mais tient également compte du stockage de l'humidité dans le sol et de la future perte d'humidité due à la température. Il requiert des données mensuelles sur la température et les intempérés, ainsi que des informations sur la capacité de rétention d'eau du sol (*Debbie, 2010*).

La méthode Palmer calcule un bilan hydrique à partir des relevés historiques de précipitations et de températures. La gestion de l'humidité du sol se fait en séparant le profil de la terre en deux couches distinctes. La couche supérieure a une capacité de stockage fixe (généralement 25 mm), tandis que la capacité de la couche inférieure dépend des paramètres de terre. L'eau ne peut se déplacer entre les couches qu'une fois que la couche supérieure a atteint sa pleine capacité (ou est épuisée). L'évapotranspiration potentielle (PET) est évaluée par la méthode Thornthwaite. Lorsque la PET dépasse les précipitations (P), l'humidité du sol est perdue par évapotranspiration. La méthode Palmer suppose que l'évapotranspiration potentielle épuise d'abord la couche de surface (L_s) puis la couche inférieure (L_u), de la PET et de la capacité totale en eau disponible dans les deux couches. Les équations (III-3) et (III-4) a été utilisées pour calculer les valeurs de (L_u) et (L_s) lorsque la $PET > P$

$$L_s = \min[S_s, (PET - P)] \quad \text{(III-3)}$$

$$L_u = [(PET - P) - L_s] \frac{S_u}{AWC}, L_u \leq S_u \quad \text{(III-4)}$$

L_s représente la perte d'humidité de la couche superficielle, tandis que S_s correspond à l'humidité disponible stockée dans la couche superficielle au début du mois. PET correspond à l'évaporation potentielle du mois ; P correspond aux précipitations du mois. L_u correspond à la diminution des niveaux sous-jacents ; S_u correspond à l'humidité stockée dans les niveaux sous-jacents au début du mois ; AWC correspond à la capacité réelle des deux niveaux.

La méthode Palmer utilise trois formules supplémentaires pour calculer le bilan hydrique : la recharge potentielle (PR), la perte potentielle (PL) et le ruissellement potentiel (PRO). On calcule les trois termes en (mm) en utilisant les équations (III-5), (III-6), (III-7), (III-8) :

$$PR = AWC - (S_s + S_u) \quad (III-5)$$

$$PL_s = \min(PET, S_s) \quad (III-6)$$

$$PL_u = (PET - PL_s) \frac{S_u}{AWC}, PL_u \leq S_u \quad (III-7)$$

$$PRO = AWC - PR = S_s + S_u \quad (III-8)$$

Afin de mesurer les fluctuations climatiques locales, Palmer a développé les valeurs CAFEC (ajustement climatique adapté aux conditions actuelles). Selon [Aiguo Dai \(2011\)](#), il a initialement établi des coefficients de bilan hydrique pour chaque mois (i) en fonction du climat local, généralement calculés sur une période d'étalonnage. Le coefficient d'évaporation (α), le coefficient de recharge (β), le coefficient de ruissellement (γ) et le coefficient de perte (δ) sont parmi ces coefficients. On déterminera les valeurs en utilisant l'équation (III-9) :

$$\alpha_i = \frac{\bar{E}_i}{\bar{PE}_i}, \beta_i = \frac{\bar{R}_i}{\bar{PR}_i}, \gamma_i = \frac{\bar{RO}_i}{\bar{PRO}_i}, \delta_i = \frac{\bar{L}_i}{\bar{PL}_i}, \text{ Where } i = 1, \dots, 12 \quad (III-9)$$

En haut de l'équation ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), les barres représentent la moyenne pendant la période d'étalonnage. Le rapport moyen à long terme entre le débit d'eau et sa valeur potentielle est donc représenté par ces coefficients. La valeur CAFEC est simplement le coefficient de multiplication de la valeur potentielle du débit d'eau. Plus précisément, l'équation (III-10) définit les précipitations CAFEC ((P))[~], qui sont la quantité de précipitations requises pour maintenir des niveaux d'humidité du sol normaux pendant une période donnée.

$$\tilde{P} = \alpha_i PET + \beta_i PR + \gamma_i PRO - \delta_i PL \quad (III-10)$$

L'écart d'humidité pour le mois correspond à la différence (d) entre les précipitations réelles (P) pour un mois donné et les ((P))[~] calculées pour le même mois (équation (III-11)).

$$d = P - \tilde{P} \quad (III-11)$$

Le bilan hydrique de surface peut être influencé de manière différente par des valeurs spécifiques de (d) en fonction de l'emplacement et de la période de l'année. Selon [Aiguo Dai \(2011\)](#), Palmer a résolu cette situation en multipliant (d) par le coefficient caractéristique climatique (K) (équation III-12) afin d'obtenir l'indice d'anomalie d'humidité (Z).

$$Z = dK \quad (III-12)$$

Où (K) est défini par Palmer pour le mois (i) (équations (III-13), (III-14) et (III-15)) :

$$K_i = \frac{17,67}{\sum_{i=1}^{12} \bar{a}_i K'_i} K'_i \quad \text{(III-13)}$$

$$K'_i = 1,5 \text{Log}_{10} \left(\frac{T_i + 2,8}{\bar{a}_i} \right) + 0,5 \quad \text{(III-14)}$$

$$T_i = \frac{\overline{PET} + \overline{R}_i + \overline{RO}_i}{\overline{P}_i + \overline{L}_i} \quad \text{(III-15)}$$

Le (Ti) est une évaluation de la relation entre la demande d'humidité et l'offre d'humidité pour le mois et la région. Ensuite, on utilise l'indice (Z) afin de déterminer la valeur PDSI pour le temps t (Xi) (équation III-16) :

$$X_i = 0,897X_{i-1} + \frac{Z_i}{3} \quad \text{(III-16)}$$

Où Xi est la valeur PDSI pour le mois (i) et Xi-1 est le PDSI pour le mois précédent.

La classification de la gravité de la sécheresse selon les valeurs de l'indice de précipitations normalisé (SPI), de l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisé (SPEI) et de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) est présentée dans le tableau III-11.

Tableau III-11 Classification de la gravité de la sécheresse pour (SPI), (SPEI) et (PDSI) (*Mckee et al,1993 ; Zhang et al,2009*).

Catégorie	SPI et SPEI	Catégorie	PDSI
Extrêmement humide	≥ 2,00	Extrêmement humide	≥ 4,00
Gravité humide	1,5 to 1,99	Très humide	3,00 to 3,99
Modérément humide	1,00 to 1,49	Modérément humide	2,00 to 2,99
Proche de la normale	-0,99 to 0,99	Légèrement humide	1,00 to 1,99
Modérément sec	-1,00 to -1,49	Début de période humide	0,50 to 0,99
Gravité sec	-1,50 to -1,99	Proche de la normale	0,49 to -0,49
Extrêmement sec	≤ -2,00	Début de sécheresse	-0,50 to -0,99
		Sécheresse légère	-1,00 to -1,99
		Sécheresse modérée	-2,00 to -2,99
		Sécheresse grave	-3,00 to -3,99
		Sécheresse extrême	≤ -4,00

La réaction des variations de l'humidité du sol aux anomalies de précipitations est relativement rapide. Toutefois, les variations de précipitations à long terme sont plus préjudiciables à la quantité d'eau stockée dans les eaux souterraines, les débits fluviaux et réservoirs. Ainsi, la durée adéquate pour le (SPI) varie en fonction du type de sécheresse étudié et de son application prévue. Prenons l'exemple de la sécheresse météorologique qui peut être évaluée en utilisant un indice de précipitation (SPI) calculé sur 1 à 2 mois, tandis que la sécheresse agricole peut nécessiter un indice de précipitation (SPI) calculé sur 1 à 6 mois. Par contre, les sécheresses hydrologiques peuvent demander un indice de précipitation (SPI) calculé sur une période de 6 à 24 mois, voire plus. Cette étude scientifique visait à déterminer l'efficacité des indicateurs de sécheresse météorologique (SPI, SPEI, PDSI) dans la détection et la prédiction des sécheresses agricoles et hydrologiques. Toutefois, dans le cadre de cette comparaison, nous avons simplement utilisé ces indices avec une échelle de temps plus étendue, qui était auparavant fixée à 12 mois. En dépit de cette contrainte, les indices SPI et SPEI présentent une grande souplesse. Par contre, l'indice PDSI s'est avéré pratique pour évaluer la sévérité et la durée des sécheresses prolongées.

III- 4.4. Analyse de corrélation entre (SPI ; SPEI) et (SPI ; PDSI)

Dans ce paragraphe, nous avons comparé l'indice de précipitations standardisé (SPI) et l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI) sur une période de 12 mois, afin d'évaluer leur concordance dans la classification de la sécheresse sur la même période. La figure III.9 présente les résultats sous la forme d'un nuage de points de corrélation. Le SPI et le SPEI sont fortement corrélés dans la figure, même s'il peut y avoir des différences légères dans la mesure de l'ampleur de phénomène de sécheresse entre les deux indices. Les deux indicateurs repèrent les sécheresses dans les mêmes années : 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021. On peut représenter la relation linéaire entre le SPI et le SPEI en utilisant l'équation (III-17). On peut simplifier cette équation en écrivant $SPEI \approx 0,64 SPI$, avec un coefficient de corrélation $r = 0,62$.

$$SPEI = 0,648 SPI + 0,0766 \quad (III-17)$$

Cependant, certaines différences dans la gravité de la sécheresse sont observées entre les deux indices. Le SPI (12 mois) tend à indiquer des sécheresses plus graves que le SPEI (12 mois). Par exemple, lorsque le SPI atteint des niveaux de sécheresse extrêmes (indice ≤ -2), le SPEI peut n'indiquer qu'une sécheresse modérée. Cela suggère que le SPEI (12 mois) pourrait mieux saisir la gravité de la sécheresse en termes d'intensité et de durée. Les catégories de sécheresse de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) diffèrent de celles de l'indice de précipitation standardisé (SPI) et de l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI) (figure III-9a). Cela nécessite de réconcilier les classifications de sécheresse entre le SPI et le PDSI. La figure III-9b montre la corrélation entre le PDSI (12 mois) et le SPI (12 mois), qui peut être exprimée par l'équation (III-18). En simplifiant l'équation, nous obtenons $PDSI \approx 1,34 SPI$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,61$.

L'indice PDSI-12 mois montre les épisodes de sécheresse : 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021.

$$PDSI = 1,3401 SPI - 0,0721 \quad (III-18)$$

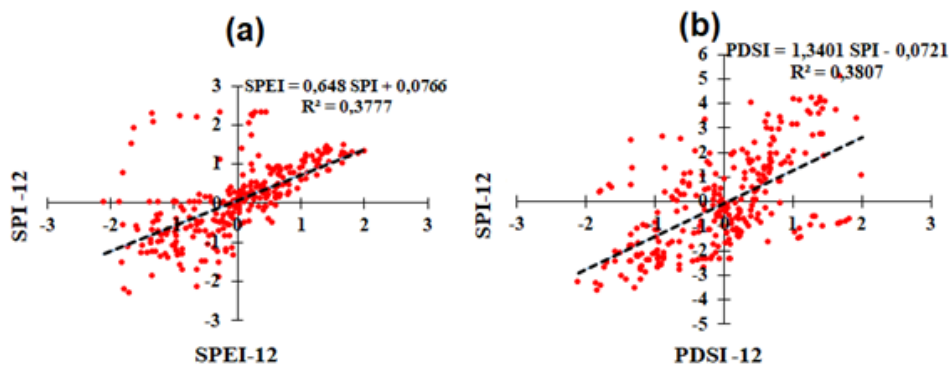


Figure III-9 (a) Relation entre SPEI-12 mois et SPI-12 mois ; (b) Relation entre PDSI-12 mois et SPI-12 mois (1999 à 2021).

III- 4.5. Analyse des propriétés de la sécheresse

La hausse de température est une cause majeure de dommages à l'agriculture, à l'économie et aux écosystèmes. La sécheresse survient après une longue période sans pluie, mais son début, son étendue et sa fin sont difficiles à déterminer. Il est donc exceptionnellement difficile de mesurer objectivement leurs propriétés en termes d'escalade, de durée et de degré spatial. La plupart des études sur la sécheresse sont menées en utilisant l'un des éléments suivants : (PDSI) basé sur l'équation de bilan de sécheresse humidité du sol ([Palmer, 1965](#)) ; approche standard de l'indice de précipitation. Il est basé sur une approche stochastique des précipitations. Le plus couramment utilisé est le SPEI qui répond aux conditions de l'indice de sécheresse. Parce que sa nature multiscalaire lui permet d'être utilisé dans divers domaines scientifiques pour détecter, surveiller et analyser les sécheresses. Comparable au PDSI et au SPI, Le SPEI mesure la gravité des périodes de sécheresse en fonction de leur concentration et de leur durée et peut reconnaître le début et la fin des scènes de saison sèche. Le SPEI permet des comparaisons spatio-temporelles de la gravité de la sécheresse. Le SPEI est statistiquement robuste, facile à calculer et dispose d'une méthodologie de calcul claire et facile à comprendre ([Vicente-Serrano et al, 2010](#)).

La pertinence de la mise en œuvre de stratégies de gestion de la sécheresse à long terme qui intègrent les évaluations des risques de sécheresse des vulnérabilités et des risques est essentielle pour renforcer la résilience d'une région à de tels événements ([Potopova et al, 2014](#) ; [Sahana et al, 2021](#)). Cette étude a mené une évaluation comparative des indices SPI (12 mois), SPEI (12 mois) et PDSI (12 mois) au cours de la période 1999-2021 pour déterminer l'ampleur de phénomène dans la région d'étude. Les variations du SPI, du SPEI et du PDSI à l'échelle de 12 mois sont illustrées dans les figures III- 10a, 10b et 10c. Les calculs du SPI, du SPEI et du PDSI ont révélé que les années humides étaient

caractérisées par de grandes valeurs positives allant de 1,01 à 2 pour le SPI, de 0,64 à 1,28 pour le SPEI et de 1,35 à 2,68 pour le PDSI. Les années 2009, 2010, 2013 et 2014 ont été identifiées comme les plus humides sur la base de ces valeurs d'indice. À l'inverse, les années extrêmement sèches ont été associées à des valeurs négatives importantes, se situant entre -1,07 et -2,1 pour le SPI, -0,68 et -1,34 pour le SPEI et -1,43 et -2,81 pour le PDSI. Les années 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021 ont été classées comme les années les plus sèches selon les valeurs d'indice calculées.

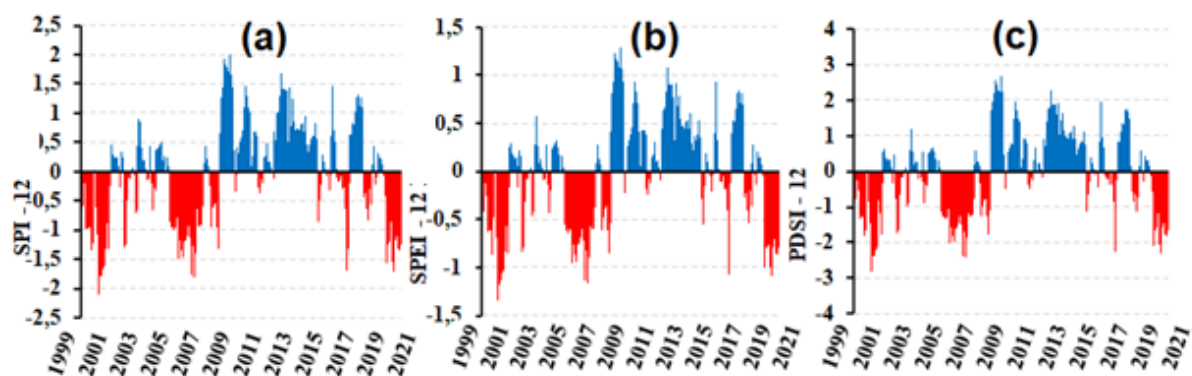


Figure III-10 Variations de : (a) SPI-12 mois ; (b) SPEI-12 mois et (c) PDSI-12 mois (1999-2021) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

III- 4.6. Analyse de fréquence

Les catégories de gravité de la sécheresse définies par (SPI), l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisé (SPEI) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) peuvent présenter une certaine concordance, comme le montre le tableau III-12. La figure III-11 clarifie davantage cela en illustrant la fréquence de concordance entre les échelles de temps de 12 mois de chaque indice. Notamment, la figure met en évidence les épisodes de sécheresse sévère de 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021. Les pourcentages de concordance pour ces années sont de 9 %, 17 % et 25 % pour les indices SPI, SPEI et PDSI respectivement.

Tableau III-12 Catégories (SPI), (SPEI) et (PDSI) (égalisés).

Catégorie	SPI	SPEI	PDSI
Extrêmement humide	$\geq 2,00$	$\geq 1,3$	$\geq 2,68$
Gravité humide	1,5 à 1,99	0,97 à 1,29	2 à 2,67
Modérément humide	1,00 à 1,49	0,65 à 0,96	1,34 à 1,99
Proche de la normale	-0,99 à 0,99	-0,64 à 0,64	-1,33 à 1,33
Modérément sec	-1,00 à -1,49	-0,65 à -0,96	-1,34 à -1,99
Gravité sec	-1,50 à -1,99	-0,97 à -1,29	-2 à -2,67
Extrêmement sec	$\leq -2,00$	$\leq -1,3$	$\leq -2,68$

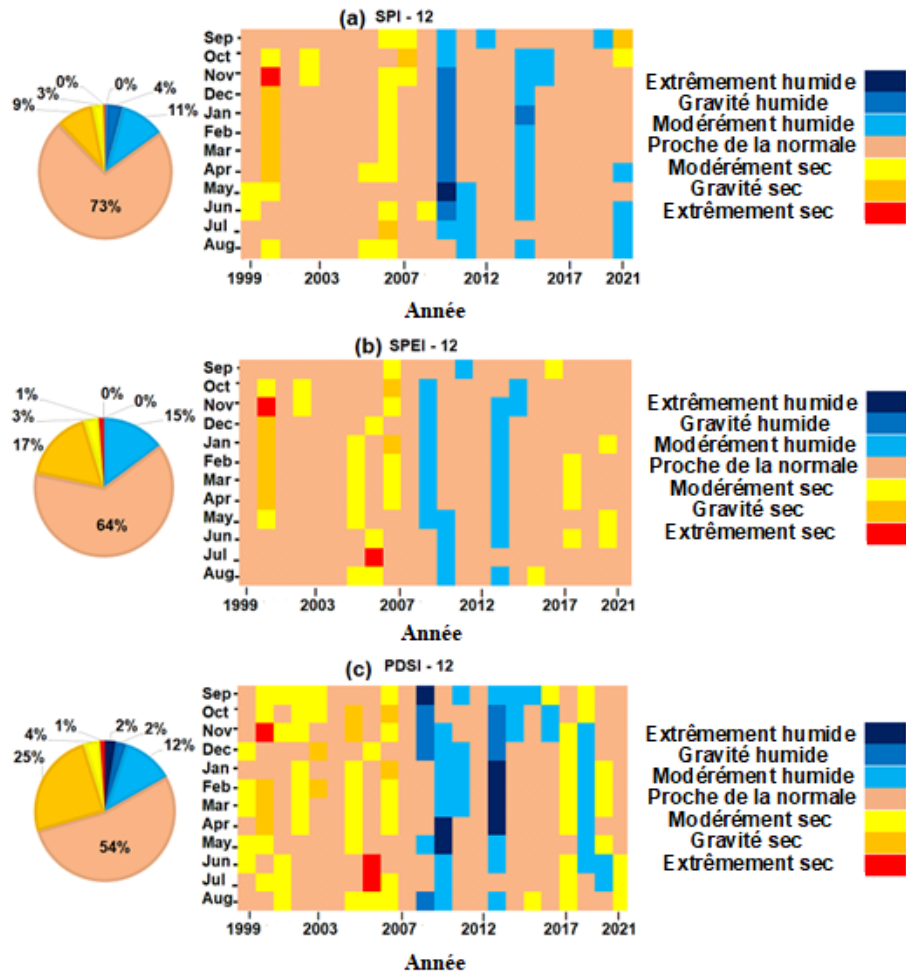


Figure III-11 Fréquence et classification des classes pour : (a) SPI-12 mois, (b) SPEI-12 mois et (c) PDSI-12 mois (1999-2021).

Une analyse du SPI, du SPEI et du PDSI sur une période de 12 mois a révélé des différences dans la fréquence des épisodes de sécheresse extrême, sévère et modérée. Cela suggère que le PDSI pourrait être plus apte à quantifier la fréquence des sécheresses à long terme que le SPI ou le SPEI. Les trois indices ont identifié des épisodes de sécheresse au cours des années 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021 (Figure III-11). Les calculs annuels du SPI, du SPEI et du PDSI ont indiqué que les valeurs positives importantes, correspondant aux années humides, se situaient dans des plages spécifiques : 1,01 à 2 pour le SPI, 0,64 à 1,28 pour le SPEI et 1,35 à 2,68 pour le PDSI. Les années 2009, 2010 et 2013 ont été identifiées comme les plus humides sur la base de ces valeurs d'indice. À l'inverse, les valeurs négatives importantes, indicatives d'années extrêmement sèches, allaient de -1,07 à -2,1 pour le SPI, de -0,68 à -1,34 pour le SPEI et de -1,43 à -2,81 pour le PDSI. Les années 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021 ont été classées comme les plus sèches (Figure III-12).

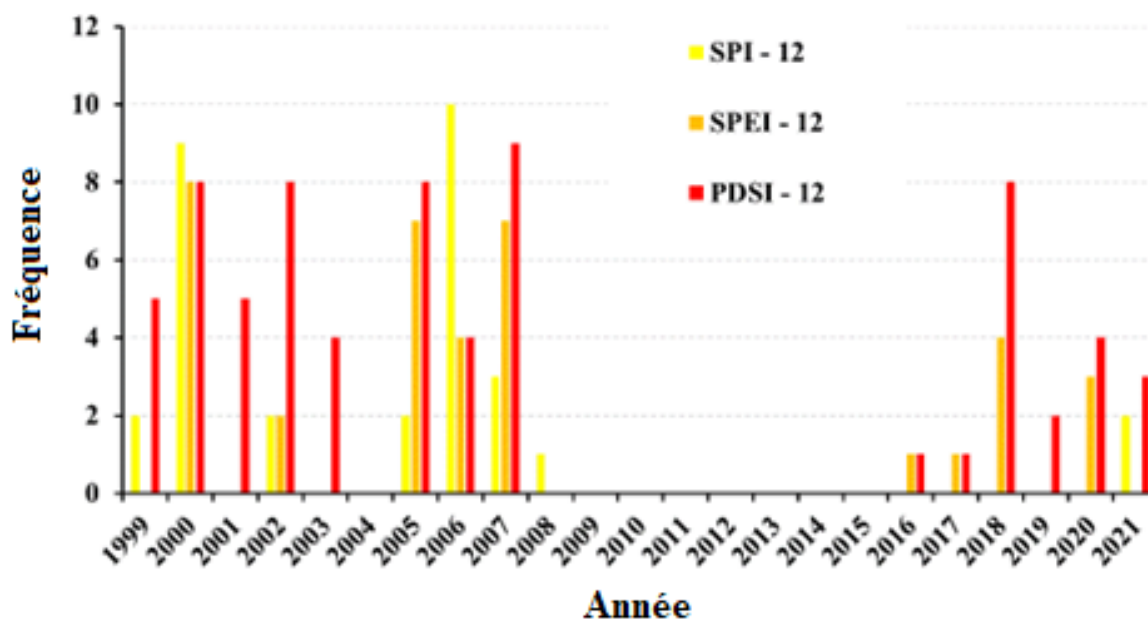


Figure III-12 Fréquences des catégories d'événements de sécheresse extrêmes, sévères et modérées pour (SPI-12 mois), (SPEI-12 mois) et (PDSI-12 mois) (1999-2021).

On compare le SPEI avec le SPI et le PDSI et montrons que les indicateurs SPEI et PDSI produisent des résultats différents du SPI en termes de variabilité annuelle dans les conditions climatiques actuelles et de fluctuations de température légèrement plus élevées. On conclut que la prise en compte de l'évapotranspiration (SPEI et PDSI) fournit plus d'informations dans les régions à fortes fluctuations de température interannuelles tout en confirmant que les sécheresses sont principalement causées par des déficits pluviométriques. Cependant, le SPEI et le PDSI se sont récemment révélés plus efficaces que le SPI pour détecter les sécheresses agricoles et hydrologiques. Il est donc important de se demander s'il est pertinent d'intégrer l'ETP dans le calcul de l'indicateur. La première partie de la réponse est que le SPI n'a pas détecté la sécheresse de 2017 à 2021 car le SPI n'utilise pas l'évapotranspiration comme donnée d'entrée qui est considérée comme d'une importance cruciale pour étudier les réponses à la sécheresse dans le climat actuel qui est caractérisé par une diminution des précipitations et une augmentation de la température. Le deuxième élément de réponse est que le SPI qui s'appuie uniquement sur les données de précipitations est moins efficace que le SPEI et le PDSI pour détecter les sécheresses récentes. Il est donc important d'examiner la réponse de l'indice SPI au changement climatique. La corrélation temporelle réalisée ci-dessus considère l'ensemble des séries de chaque variable. C'est la première indication qui a permis de déterminer les pas de temps les plus adaptés aux sécheresses considérées mais elle mérite d'être complétée par des études plus détaillées avec un accent particulier sur les valeurs extrêmes.

La sécheresse dans le bassin versant d'Oued Lakhdar a des conséquences à court, moyen et long terme. À court et moyen terme, il s'agit notamment de l'assèchement des plans d'eau, avec disparition des eaux de surface lors des périodes de sécheresse prolongées comme celles observées dans la zone

d'étude de 1999 à 2021. Cela détruit les habitats naturels, étant donné que 80 % du bassin versant est constitué de terres cultivées, la réduction des précipitations et l'activité de sécheresse entraînent une diminution de la qualité des sols. De plus, les débits des oueds, des rivières et des niveaux des eaux souterraines subissent un assèchement à long terme. La sécheresse déclenche également la migration des animaux sauvages, voire leur mort. Les animaux à la recherche de nouveaux habitats peuvent être confrontés à une vulnérabilité et à des menaces accrues. Les agriculteurs dépensent davantage pendant les sécheresses, car ils investissent davantage dans l'arrosage des cultures pour maintenir les rendements. En outre, les sécheresses peuvent entraîner des épidémies de maladies d'origine hydrique en raison des déplacements humains et de l'insécurité hydrique, avec des conséquences potentielles sur la santé.

Ce chapitre vise à aborder l'existence de la sécheresse dans le contexte du changement climatique et à combler les lacunes de la recherche dans le bassin versant d'Oued Lakhdar. On analyse la variabilité spatiotemporelle de la sécheresse en utilisant trois indices de sécheresse : SPI, SPEI et PDSI. Le manque d'études antérieures utilisant ces indices dans le bassin versant a motivé leur sélection. De plus, une inter comparaison a été effectuée de ces indices (SPI, SPEI et PDSI) pour déterminer l'approche la plus appropriée pour identifier les périodes de retour de sécheresse à long terme. Nos résultats suggèrent que SPEI et PDSI sont mieux adaptés à cette fin en raison de leur intégration des données de précipitations et de température dans leurs calculs. Par conséquent, ces indices offrent une compréhension plus complète de la manière dont le changement climatique influence les schémas de sécheresse.

L'analyse a révélé un fort signal de sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar, le déficit pluviométrique le plus important s'étant produit en 1966, caractérisé par une diminution de 56 % des précipitations. Cet événement de sécheresse a touché le Maroc, la Tunisie et l'Andalousie en Espagne. Bien que nous n'ayons pas identifié d'études directement comparables sur l'impact du changement climatique sur l'intensité de la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar, nos conclusions concordent avec des enquêtes scientifiques. Par exemple, [Hadour et al, \(2020\)](#) ont étudié l'évolution hydrologique de trois grands bassins fluviaux du nord-ouest algérien (Cheliff, Tafna et Macta) sous l'influence du changement climatique. L'analyse des tendances observées a révélé une diminution significative du ruissellement mensuel entre 1970 et 1999. La principale raison de cette baisse a été la diminution des précipitations et la hausse de l'évapotranspiration potentielle (ETP) due à l'augmentation des températures.

Conclusion

Dans ce chapitre, la variation de climat et la sécheresse ont été examinées dans la zone d'étude d'Oued Lakhdar de 1999 à 2021. L'analyse a révélé une séquence de périodes sèches et humides sur la période d'étude. Pour quantifier les caractéristiques de la sécheresse à long terme, trois indices de sécheresse ont été utilisés : l'indice de précipitations standardisé (SPI-12 mois), l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI-12 mois) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI-12 mois). Nos résultats indiquent que les trois indices présentent des différences dans leur capacité à quantifier la gravité de la sécheresse. Notamment, la hausse significative de la température observée dans la période d'étude (différence moyenne entre le maximum et le minimum dépassant 3°C sur 23 ans) a conduit à un écart substantiel entre les valeurs du SPI et du SPEI. Cela suggère que le SPEI, qui intègre les données de température aux côtés des précipitations, pourrait être plus apte à capturer les événements de sécheresse influencés par la hausse des températures par rapport au SPI, qui s'appuie uniquement sur les précipitations. En outre, l'analyse a identifié les années 2000, 2005, 2006, 2007, 2017 et 2021 comme les plus sèches dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Ce chapitre met en lumière deux questions clés pour les recherches futures :

- 1) Identifier l'indicateur empirique le plus efficace pour la détection des sécheresses ;
- 2) Comprendre comment les indicateurs météorologiques de sécheresse réagiront aux scénarios climatiques futurs.

En outre, l'intégration croissante du changement climatique et de l'intelligence artificielle nécessite d'explorer si les futurs indices de sécheresse peuvent répondre à ces demandes en constante évolution. Sur la base de nos conclusions, nous recommandons des investissements proactifs dans les systèmes d'information, les institutions et les infrastructures nationales pour renforcer la résilience à la sécheresse. Ces investissements devraient se concentrer sur plusieurs domaines clés : développer des réseaux d'observation et des cadres d'alerte précoce ; établir des cadres pour les stratégies de gestion de l'eau, telles que le dessalement, la réutilisation de l'eau et la collecte des eaux de pluie ; promouvoir l'éducation et la préparation du public par le biais de mécanismes tels que la législation sur la sécheresse ; mettre en œuvre des mécanismes de financement des risques pour les populations et les secteurs vulnérables ; et favoriser une planification coordonnée à différents niveaux, englobant à la fois les interventions d'urgence à court terme et les stratégies d'investissement à long terme. En répondant à ces questions et en mettant en œuvre ces recommandations, les pays peuvent être mieux préparés à atténuer les impacts de la sécheresse dans un climat en évolution.

Chapitre IV

**Les phénomènes extrêmes dans le contexte des changements
climatiques : Cas de bassin versant d'Oued Lakhdar**

Introduction

L'Algérie, située en Afrique du Nord, est reconnue par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) comme l'un des pays les plus vulnérables au changement climatique. Cette vulnérabilité se manifeste sous la forme d'événements météorologiques extrêmes répétés, notamment des inondations et des sécheresses. Ce chapitre vise à répondre aux questions cruciales suivantes : Quelles sont les conséquences environnementales des sécheresses et des inondations extrêmes, et comment des pays comme l'Algérie peuvent-ils renforcer leur résilience face à ces phénomènes ? Le changement climatique joue un rôle essentiel dans ce contexte, en exacerbant les événements extrêmes par des modifications des régimes de précipitations et des températures. Ces variations sont susceptibles de perturber de nombreux secteurs, notamment les ressources en eau, l'agriculture, la foresterie, les régions côtières, la santé publique et les infrastructures.

IV- 1. Les recherches scientifiques sur les phénomènes extrêmes

À l'échelle mondiale, il existe plusieurs recherches scientifiques concernant les phénomènes extrêmes, cités en exemple (*Tramblay et Somot, 2018 ; Youb et al, 2022 ; Isia et al, 2023 ; Goksu soydan oksa, 2023 ; Simsek et al, 2023 ; Yang et al, 2024*). *Yang et al en 2024* demandent des études futures concernant les effets des rivières atmosphériques sur la sécheresse et les inondations dans le bassin inférieur du fleuve Yangtze. Les rivières atmosphériques n'ont pas de relation directe avec la sécheresse et les inondations, mais l'idée peut être étendue à des recherches plus poussées par les auteurs et certaines discussions peuvent être ajoutées à la littérature à l'avenir. L'étude révèle que l'humidité excessive provenant du Pacifique occidental joue non seulement un rôle clé dans la configuration des courants d'air, mais est également le principal déclencheur d'un mouvement vertical diabatique accru, entraînant une augmentation des précipitations.

À l'échelle nationale, alors que les recherches existantes ont documenté des sécheresses extrêmes dans les régions du nord de l'Algérie (*Ghenim et Megnounif, 2011, 2013 ; Elouissi et al, 2017 ; Djellouli et al., 2016, 2019 ; Bendjema et al, 2019 ; Mhamed et al, 2022 ; Dahmani et al, 2024 ; Ziari et Medjerab, 2024*) et les inondations extrêmes dans la région élargie (*Ketrouci et al, 2012 ; Sadeuk Ben Abbas et al, 2020 ; Kourat et al, 2022*). *Ziari et Medjerab en 2024*, visaient à évaluer les tendances de la sécheresse à Annaba, en Algérie, en tenant compte du réchauffement climatique et des conditions météorologiques extrêmes, en utilisant des indices quantitatifs pour améliorer la compréhension et la prévision de la sécheresse. Les analyses révèlent une divergence critique dans les outils d'évaluation de la sécheresse. Alors que les températures mensuelles sont stables bien que l'on puisse proposer un impact cohérent sur l'évapotranspiration, l'enregistrement SPEI (comptage des températures) montre une extension de la saison sèche par rapport au SPI basé uniquement sur les précipitations. Cela souligne l'importance de prendre en compte la température parallèlement aux précipitations pour une évaluation précise de la sécheresse.

Au niveau territorial, peu d'études existent, nous citons à titre d'exemples : *Gherissi et al en 2021* ont appliquées des listes de périodes sèches SPI, SSFI, IP et coefficient d'hydraulicité, sur la période s'amplifiant de 1970 à 2014, a permis de distinguer les fréquences des périodes humides et sèches, ainsi que les fréquences des écoulements d'abondance et de déficit. Des décennies manquantes sont les années 1980, 1990 et 2000, avec une tendance à la baisse des précipitations visible pour la période (2008/2014). Les résultats obtenus grâce à l'utilisation de techniques mesurables indiquent des épisodes de précipitations entre 1976 et 1981, qui témoignent d'une évolution de la gestion des précipitations et de l'hydrologie. Ces interruptions se traduisent par une augmentation de 24 % de la pluviométrie et de 57 % du débit par rapport à la période antérieure (quelques jours avant la rupture). Cette incohérence climatique se manifeste et affecte les ressources en eau. De plus, le bassin versant a enregistré une diminution des précipitations et une hausse de la température entre 1982 et 2008.

En 2023, Berhail et Katipoğlu ont cherché à comparer le niveau de compréhension entre le record SPI et le record SPEI, la variante du premier, aux échelles de temps 1, 3, 6, 9, 12 et 24 mois. Ces données ont été compilées à partir du bol Mekerra à l'aide de la répartition temporelle des données sur les précipitations et la température pendant 42 ans de 1970 à 2011. Les auteurs ont utilisé les mesures kappa de Cohen et la méthode Bland-Altman pour déterminer le niveau de compréhension entre le SPI et le SPEI. De plus, la méthode d'examen de la dérive inventive (ITA) a également été utilisée pour analyser les modèles de sécheresse extrême. Les résultats obtenus à partir de la mesure kappa de Cohen ont révélé la proximité d'un niveau critique de divergence entre les valeurs du SPI et du SPEI sur les échelles de temps. En outre, les chercheurs ont observé une relation directe positive ($r > 0,75$, $p < 0,0001$) entre les évaluations à l'étude. La présence d'une petite distinction cruelle entre les recherches de Flat et d'Altman a confirmé le niveau de compréhension entre les appareils expositifs sous-jacents à la pensée. En plus de cela, les résultats rassemblent également qu'en cas d'inaccessibilité des informations de température pour conduire le SPEI.

Les recherches scientifiques spécifiquement axées sur le bassin versant d'Oued Lakhdar restent rares, ce chapitre vise à combler cette lacune. Par conséquent, notre objectif principal est de quantifier les sécheresses à court, moyen et long terme. Pour y parvenir, l'étude utilisera le SPI et le SPEI à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 9, 12 et 24 mois).

Cette réflexion souligne l'importance de prendre en compte l'interaction entre la température, les précipitations et l'évapotranspiration pour mieux comprendre et anticiper les changements de périodes de sécheresse dans le bassin versant d'Oued Lakhdar. Ces expériences sont essentielles pour une gestion économique des ressources en eau et pour l'adaptation au changement climatique dans la région.

Ce chapitre se distingue par son examen complet des données climatiques à long terme pour examiner les schémas de périodes de sécheresse dans une région particulière (bassin versant d'Oued Lakhdar) fortement touchée par le changement climatique. En comparant l'adéquation de deux rapports sur la saison sèche (SPEI et SPI), elle fournit des expériences utiles sur la manière de faire progresser les évaluations de la saison sèche en prenant en compte le rôle de la température dans l'évapotranspiration. Cette enquête enrichit les écrits existants sur la gestion de la saison sèche et l'adaptation au changement climatique, offrant une étude de cas importante pour des régions sèches et semi-arides similaires dans le monde.

IV- 1.1. La zone d'étude: Cas de bassin versant d'Oued Lakhdar

La zone d'étude de l'Oued Lakhdar est située au Nord-Ouest de l'Algérie et se jette dans le bassin versant de la Tafna. Il se situe entre 34,70° et 34,86° de latitude nord et 1,09° et 1,3° de longitude ouest (Figure IV-1). Le bassin versant est bordé par le bassin versant de la Mefrouche au sud, le bassin versant de l'Oued Isser à l'est et le bassin versant de la Sikkak à l'ouest. La superficie du bassin versant de l'Oued Lakhdar est de 170 km², avec une circonférence d'environ 70 km. Selon les données de l'agence nationale des ressources hydrologiques (ANRH), l'altitude varie de 722 m (la plus basse) à 1606 m (la plus haute), avec une altitude moyenne de 1130 m. La vallée principale s'étend sur 30 km, le climat du bassin versant est classé comme semi-aride, avec des précipitations annuelles moyennes de 420 mm (1970-2021).

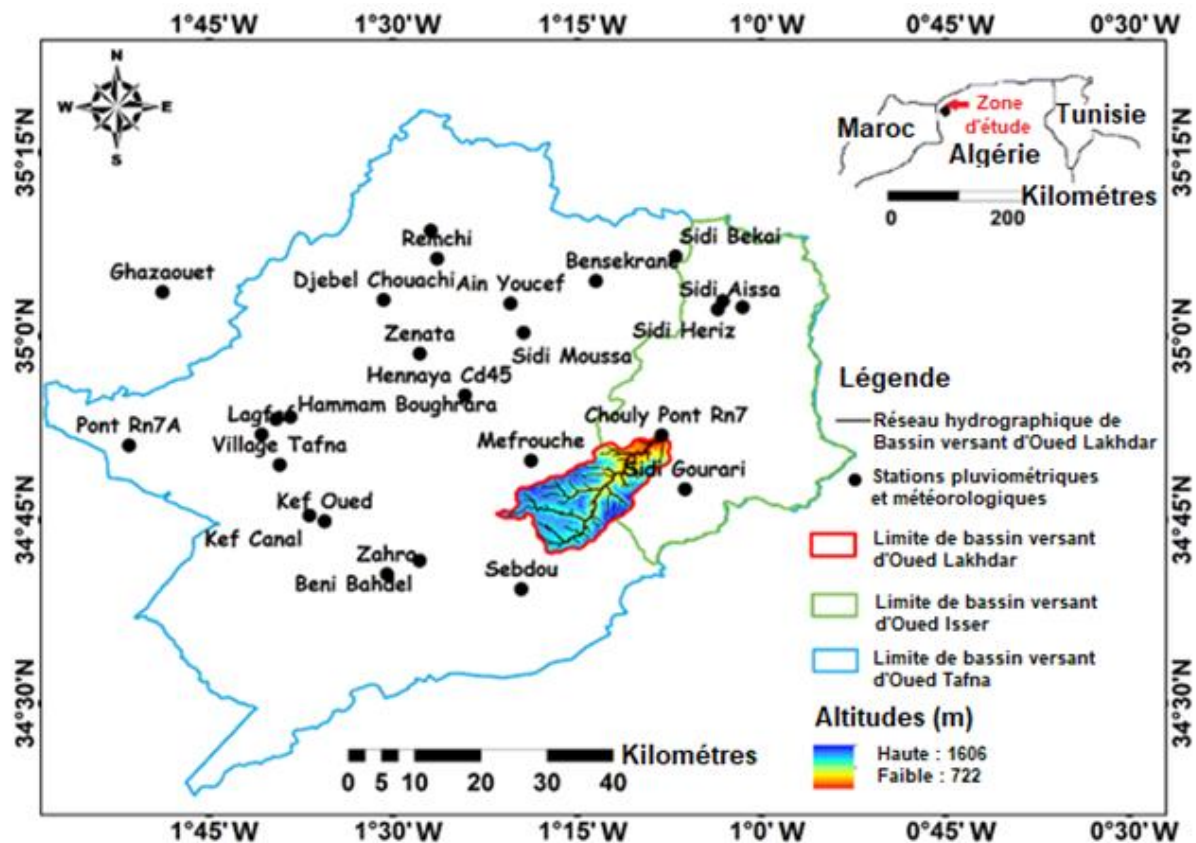


Figure IV-1 Localisation géographique du bassin versant d'Oued Lakhdar

IV- 2. Acquisition de données

Pour étudier l'évolution des événements extrêmes, des données ont été acquises auprès de l'agence nationale des ressources hydrologiques (ANRH). Les données englobent deux stations : la station hydrométrique de Chouly et la station météorologique de Mefrouche. La station de Chouly est stratégiquement située à l'exutoire du bassin versant de l'Oued Lakhdar, tandis que la station de Mefrouche est située à proximité immédiate du bassin versant (Figure IV-1). La période de collecte des données s'étend de 1970 à 2021. Le tableau IV-1 fournit un aperçu détaillé des stations, y compris leurs coordonnées.

Tableau IV- 1 Coordonnées des stations du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Nom de la station	Type de jauge	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période
Chouly	Précipitations	01°8'5"W	34°51'52"N	722	1970-2021
Mefrouche	Température	01°17'31"w	34°51'19"n	1110	1970-2021

IV- 3. Méthodes adoptées

Les méthodes utilisées dans ce chapitre sont représentée dans la figure IV-2.

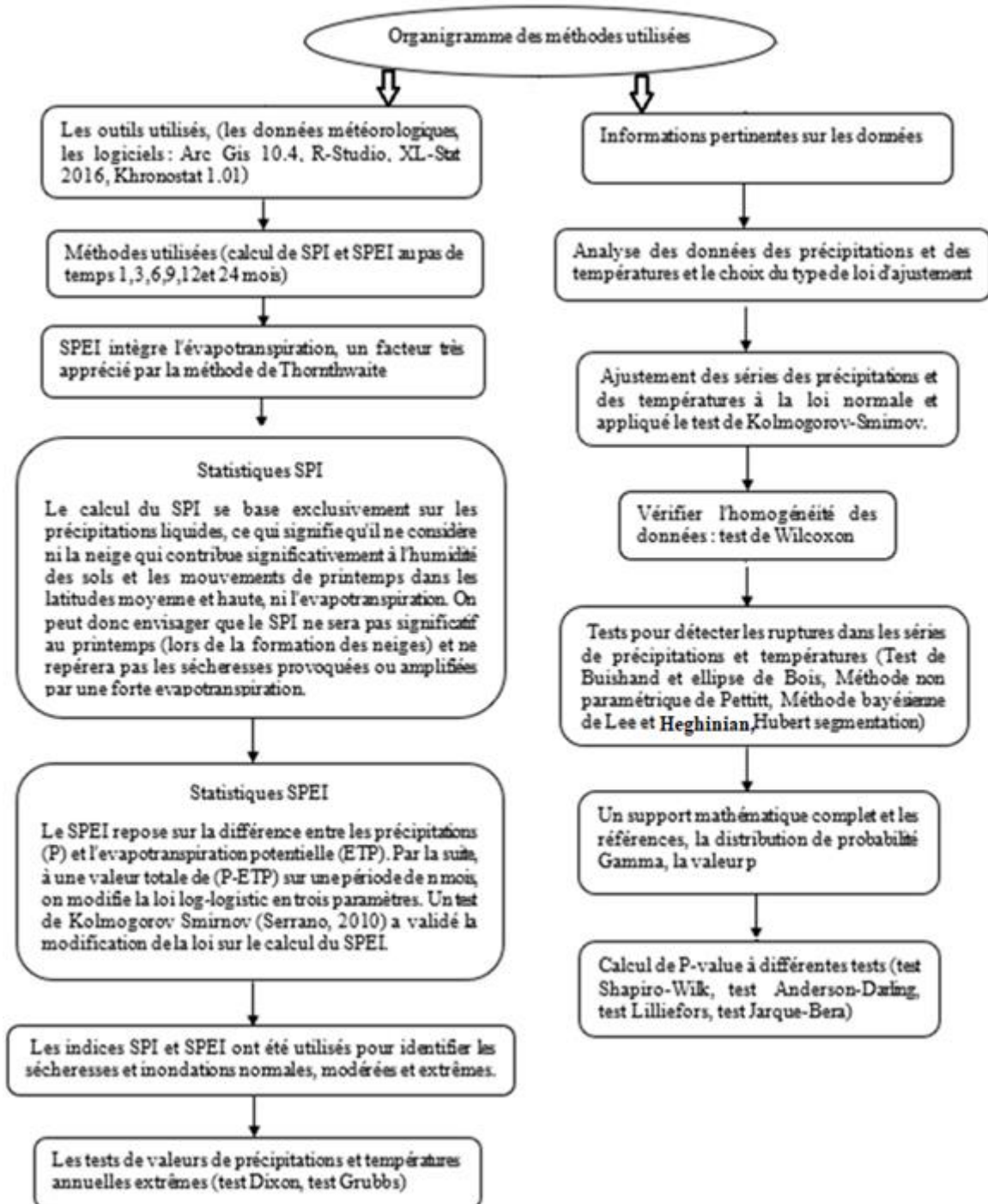


Figure IV-2 Les méthodes utilisées.

Deux indices de sécheresse ont été retenus : le SPI et le SPEI à différentes échelles de temps (1,3,6,9,12 et 24 mois). Une caractéristique commune des indices sélectionnés est qu'ils sont tous ont été calculés on se basons sur des données mensuelles de précipitations et de températures enregistrées sur une période de 52 ans.

IV- 3.1. Classification des températures ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et des températures élevées ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$)

La zone d'étude d'Oued Lakhdar connaît un climat semi-aride avec des précipitations et des températures variables, Il reçoit une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 401 mm. La température maximale quotidienne moyenne est de 21°C , tandis que la température minimale moyenne est de 15°C .

Nous fournissons également des données sur le nombre de jours de précipitations et le nombre de jours de température ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et de température élevée ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$). Les précipitations, la température et le débit des crues sur une période de 52 ans (1970 à 2021) ont été exploités pour analyser les sécheresses extrêmes et les inondations extrêmes.

IV- 4. Analyse des données pluviométriques et choix du type de loi d'ajustement

IV- 4.1. Analyse des données statistiques

Ce chapitre souligne l'importance d'analyser les données de précipitations annuelles à long terme. Nous utilisons les données pluviométriques des stations du bassin versant d'Oued Lakhdar comme base de nos calculs. Le tableau IV- 2 présente l'analyse statistique qui vise à identifier les caractéristiques empiriques d'une série d'observations annuelles des précipitations sur une période de 52 ans (1970-2021).

Tableau IV-2 Caractéristiques statistiques de la station de données annuelles sur les précipitations (1970-2021).

Statistiques	Précipitations annuelles (mm)
Nombre d'observations	52
Minimum	186,300
Maximum	701,100
1er quartile	338,825
Médian	409,150
3e quartile	506,625
Moyenne	428,335
Écart (n-1)	13788,545
Écart type (n-1)	117,425

IV- 4.2. Vérification de l'homogénéité de la série - Test de Wilcoxon

Nous avons appliqué le test de Wilcoxon pour vérifier la qualité de notre série de données. Il s'agit d'un test non paramétrique car il ne nécessite pas d'estimation de la moyenne ou de la fluctuation. Nous avons commencé par comparer deux échantillons d'une même série annuelle de précipitations (Station Chouly) de longueurs respectives $N_+ = 25$ valeurs et $N_- = 25$ valeurs ($N = N_+ + N_- = 25 + 25 = 50$), Le calcul de la statistique du test de Wilcoxon nous a donné les résultats suivants. Sachant que le test est appliqué pour un seuil d'implication de 5% et nous avons utilisé le logiciel XLSTAT 2016 pour calculer le test de Wilcoxon. Pour la comparaison de deux échantillons (Wilcoxon, Mann-Whitney) les conditions suivantes ont été assurées : Différence supposée (D) : 0, Niveau de signification (%) : 5, p-value : p-value asymptotique. Traitement des égalités : Hollander & Wolfe. Correction de continuité : Oui. Statistiques descriptives entre la station Mefrouche et Chouly (Tableau IV-3).

Tableau IV-3 (a) Test du signe et (b) Test de Wilcoxon

Test des signes / Test bilatéral (a)		Test signé Wilcoxon / Test bilatéral (b)	
N+	14	V	192
Espoir	12,500	Espoir	162,500
Écart (N+)	6,250	Écart (V)	1381,250
Valeur P (bilatérale)	0,690	Valeur P (bilatérale)	0,435
Alpha	0,05	Alpha	0,05

La valeur de p est calculée à l'aide d'une méthode exacte, H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution, H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes. La valeur de p calculée étant inférieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous devons rejeter l'hypothèse nulle H_0 et retenir l'hypothèse alternative, H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est inférieur à 69,00 %, (Tableau IV-4). Une approximation a été utilisée pour calculer la valeur de p, H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution, H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes. La valeur de p calculée étant inférieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous devons rejeter l'hypothèse nulle H_0 et retenir l'hypothèse alternative H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est inférieur à 43,52 %. Une correction de continuité a été appliquée, (Figure IV-3).

Tableau IV-4 Le test de Wilcoxon pour la station de Chouly.

Station	Variable\Test	Test de signe	Test de Wilcoxon
Chouly	V1	0,690	0,435

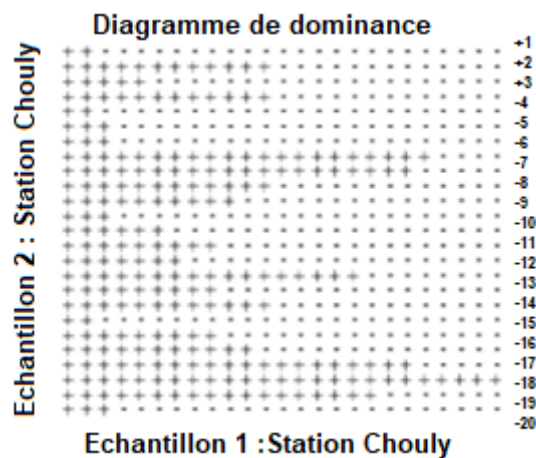


Figure IV-3 Diagramme de dominance pour la station de Chouly.

Par conséquent nous concluons que les deux séries de précipitations annuelles dans la zone d'étude sont homogènes.

IV- 4.3. Calcul du paramètre de la loi choisie

Les facteurs de la distribution de probabilité sélectionnés pour chacune des cinq séries de données ont été déterminés en utilisant le logiciel XLSTAT 2016. Le processus d'ajustement a été effectué en utilisant la méthode des moments, avec un niveau de signification de 5%.

IV- 4.3.1. Ajustement des données pluviométrique à la loi normale

L'adaptation graphique montre que la distribution normale s'adapte bien à notre échantillon de données. De la même manière nous avons appliqué le test du Chi-carré pour approuver ce résultat. Donc, à un niveau de signification de 5%. Les résultats du test du chi carré étayent l'hypothèse selon laquelle l'échantillon provient d'une distribution normale. Sur la base de ces résultats combinés, nous concluons que la série annuelle de précipitations dans la zone d'étude peut être décrite de manière adéquate par une distribution normale (figure IV-4).

Ajustement d'une loi de probabilité. Seuil de signification (%) : 5, Distribution : Normale, Méthode d'estimation : Moments Ajustement d'une loi de probabilité (station de Chouly) : H_0 : L'échantillon suit une loi normale, H_a : L'échantillon ne suit pas une distribution normale sachant que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Il y a un risque de 61,85% de rejeter l'hypothèse nulle H_0 lorsqu'elle est vraie, tandis que le reste des stations est présenté dans le tableau IV-5.

Tableau IV-5 Ajustement des précipitations en utilisant une loi normale et utilisation du test de Kolmogorov-Smirnov.

Station Chouly	Paramètres	Valeurs
	μ	428,335
	Sigma	117,425
	Test de Kolmogorov-Smirnov	
	D	0,102
	Valeur P	0,618
	Alpha	0,05

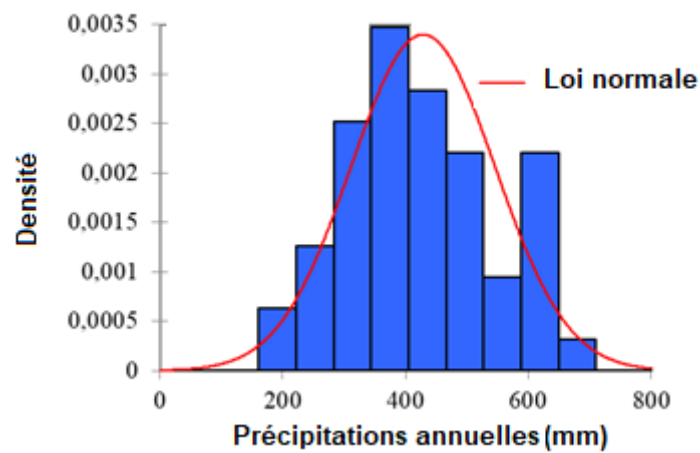


Figure IV-4 Statistiques estimées à partir des données et calculées à partir des estimateurs des paramètres de la loi normale.

Tests de normalité : Résumé : p-value (bilatérale), (Tableau IV-6 et Figure IV- 5 a et 5 b).

Tableau IV-6 p-value (bilatérale) des différentes stations.

Variable\Test	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
Valeur P (bilatérale)	0,278	0,140	0,197	0,451

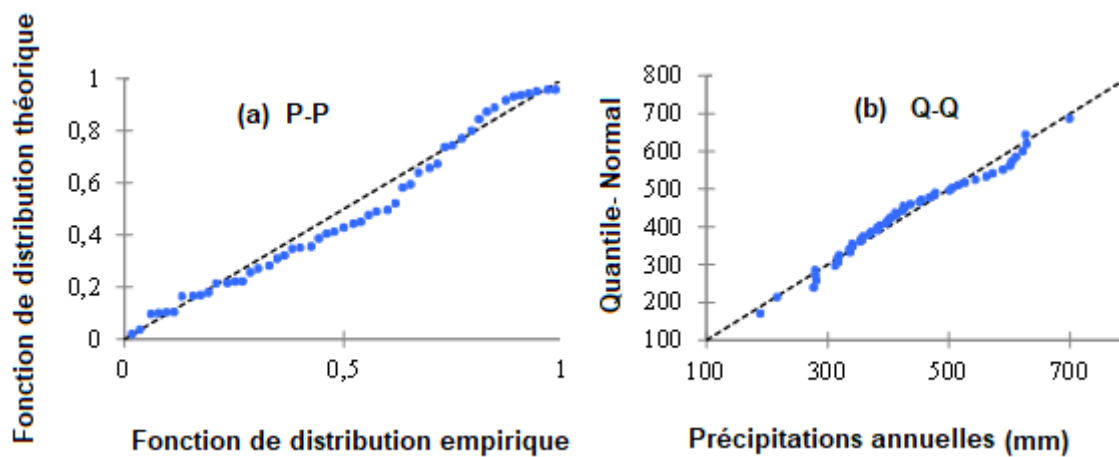


Figure IV-5 (a) Graphiques P-P (loi normale) ; (b) Graphiques Q-Q (distribution normale).

Comparaison de deux distributions (Kolmogorov-Smirnov, ...); Échantillon 1 : 30 valeurs ; Échantillon 2 : 20 valeurs Différence supposée (D) : 0 ; Niveau de signification (%) : 5 ; p-value : p-value asymptotique, H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution ; H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes. Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 même si elle est vraie est de 89,28 % (Figure IV-6).

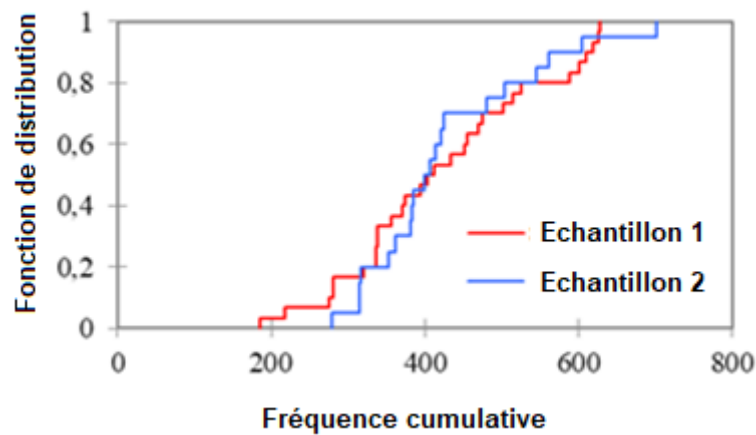


Figure IV-6 Comparaison de deux distributions (Kolmogorov-Smirnov).

IV- 4.4. Tests de détection des ruptures dans la série des précipitations

Identification : station Chouly. Variable étudiée : précipitation annuelle. Unité : mm. Chronique : 1970-2021.

IV- 4.4.1. Vérification du Buishand et ellipse de bois

Acceptation de l'hypothèse nulle (absence de rupture) au seuil de confiance de 99% ; le seuil de confiance de 95% a rejeté l'hypothèse nulle (absence de rupture) ; seuil de confiance de 90% refuse l'hypothèse nulle (absence de rupture). L'ellipse de Bois est représenté dans la figure IV-7.

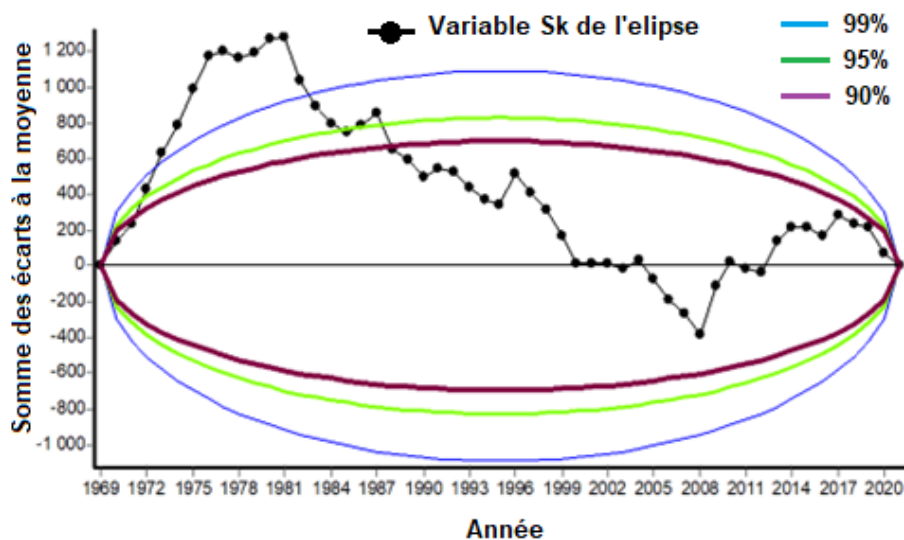


Figure IV-7 Analyse de Buishand et ellipse de Bois pour les données de précipitations (1970-2021).

IV- 4.4.2. Méthode non paramétrique de Pettitt

Hypothèse nulle (absence de rupture) acceptée au seuil de confiance de 99%. Hypothèse nulle (absence de rupture) rejetée au seuil de confiance de 95%. Hypothèse nulle (absence de rupture) rejetée au seuil de confiance de 90%. Probabilité de dépassement de la valeur critique du test : $1,41 \cdot 10^{-02}$ en 1981. Le variable U du test de Pettitt est présenté dans la figure IV-8.

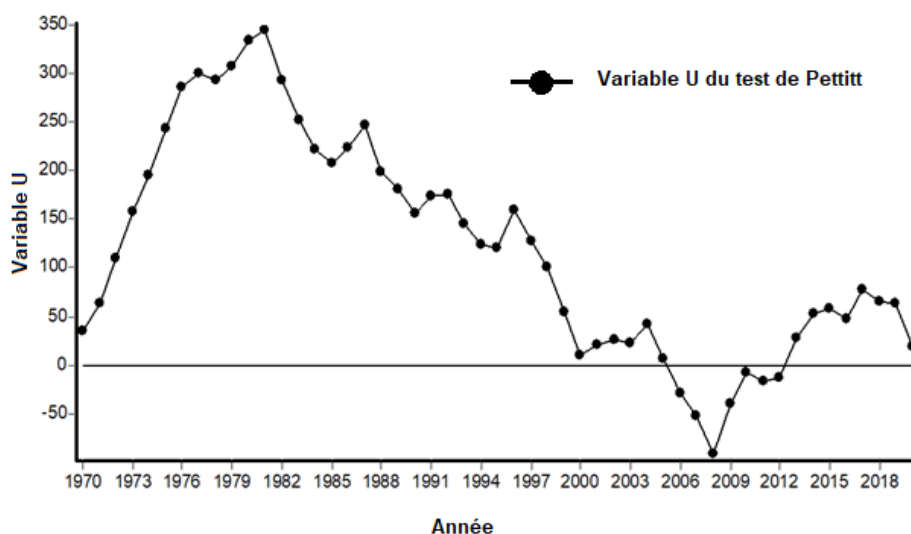


Figure IV-8 Méthode non paramétrique de Pettitt pour les précipitations (1970-2021).

IV- 4.4.3. Approche bayésienne de Lee et Heghinian

La fonction de probabilité a posteriori de la position du point de rupture a été calculée avec un mode de 0,5066 en 1976. Figure IV-9 représente la densité de probabilité "a posteriori" de la position d'un changement. Affichage des amplitudes : densité de probabilité « après » de l'amplitude d'un changement (figure IV-10).

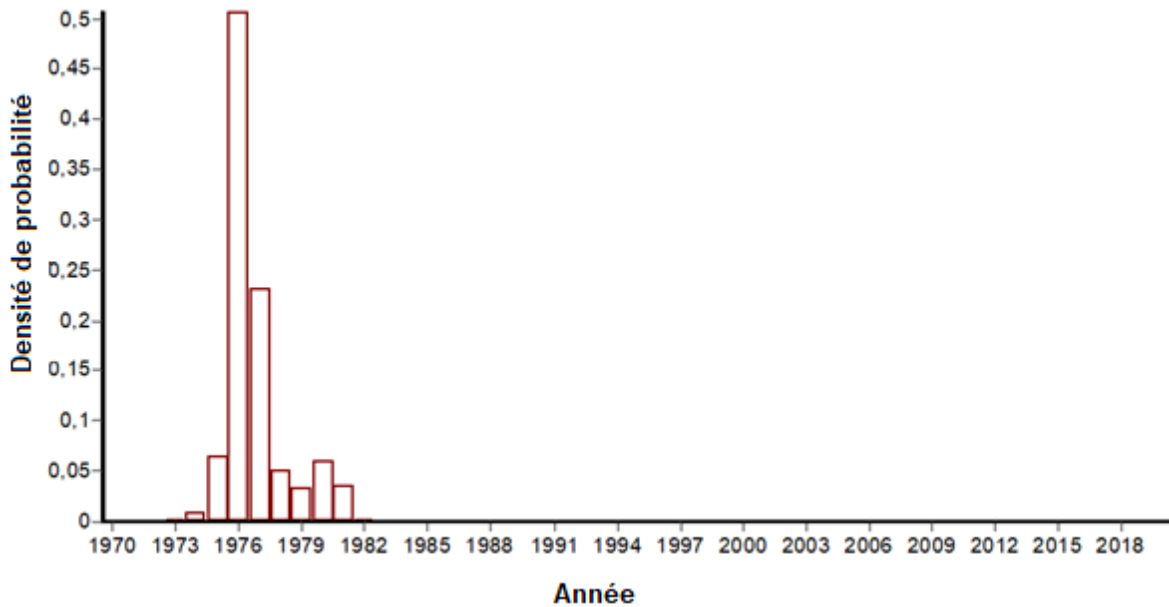


Figure IV-9. Mise en œuvre de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Graphique de probabilités) pour les précipitations (1970-2021).

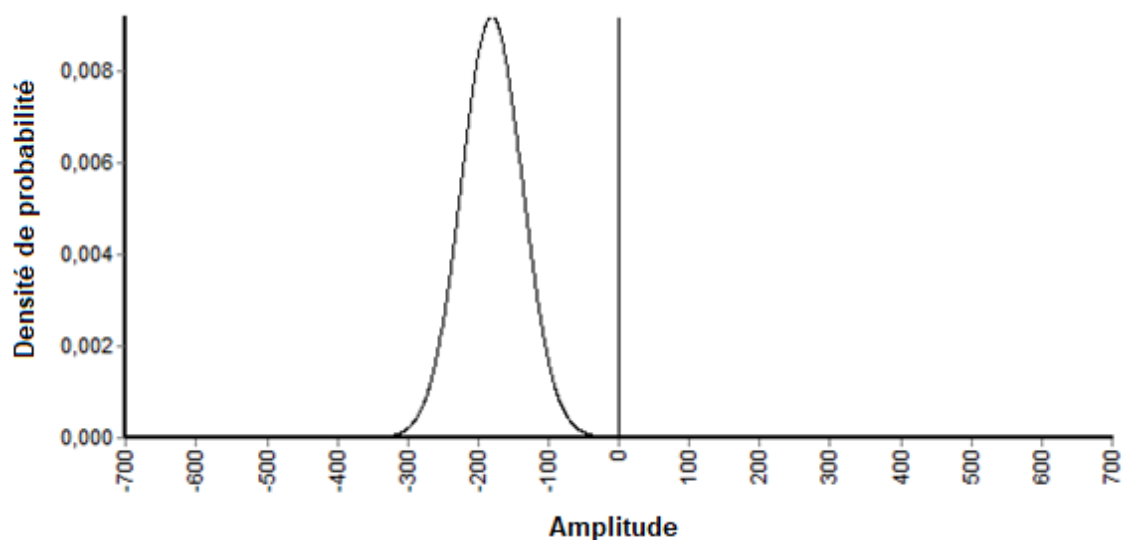


Figure IV-10 Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Graphique amplitudes) pour les précipitations (1970-2021).

IV- 4.4.4. Segmentation de Hubert

Niveau de signification du test de Scheffé : 1% et les résultats de test sont présentés dans le tableau IV- 7.

Tableau IV- 7 Les résultats de segmentation de Hubert pour les précipitations (1970-2021).

Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1970	1976	595,571	37,452
1977	2021	402,289	103,278

IV- 4.5. Analyse des données de température et choix du type de loi d'ajustement

Ajustement d'une loi de probabilité (Tableau IV-8) :

Tableau IV-8 Test de Kolmogorov-Smirnov de la station Mefrouche.

Station Mefrouche	Paramètres	Valeurs
	μ	
	Sigma	1,526
	Test de Kolmogorov-Smirnov	
	D	0,069
	Valeur P	0,950
	Alpha	0,05

H_0 : L'échantillon suit une distribution normale, H_a : L'échantillon ne suit pas une distribution normale. Étant donné que la valeur de p calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 même si elle est vraie est de 94,96 %, (Figure IV-11).

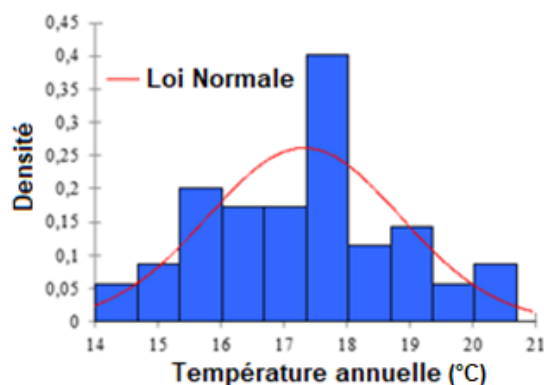


Figure IV-11 Statistiques estimées à partir des données et calculées à partir des estimateurs de paramètres de la loi normale.

IV- 4.5.1. Tests de détection des ruptures dans la série des données des températures

Identification : station Mefrouche. Variable étudiée : température annuelle. Unité : °C. Chronique : 1970-2021

IV- 4.5.1.1. Méthode non paramétrique de Pettitt

Hypothèse nulle (absence de rupture) acceptée au seuil de confiance de 99%. Hypothèse nulle (absence de rupture) rejetée au seuil de confiance de 95%. Hypothèse nulle (absence de rupture) rejetée au seuil de confiance de 90%. Probabilité de dépassement de la valeur critique du test : $1,37 \cdot 10^{-02}$ en 1983. La figure IV-12 montre le variable U du test de Pettitt.

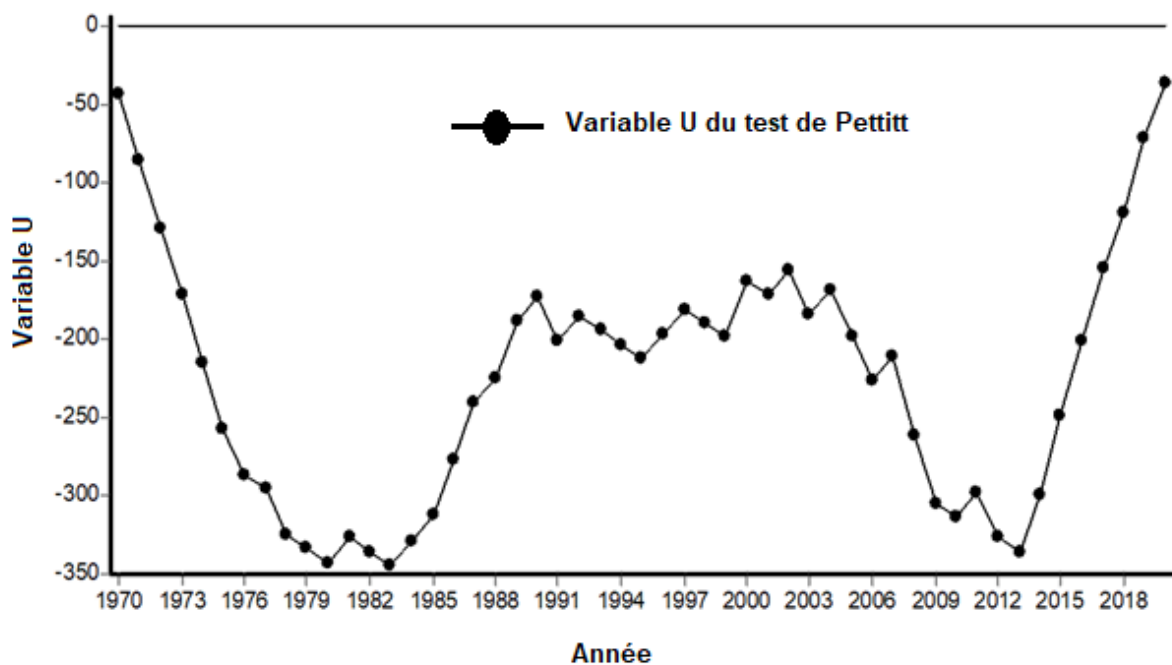


Figure IV-12 Approche de Pettitt pour les températures (1970-2021).

IV- 4.5.1.2. Segmentation de Hubert

La méthode d'Hubert est résumé dans le tableau IV-9. Niveau de signification du test de Scheffé : 1%.

Tableau IV- 9 Les résultats de segmentation de Hubert pour les températures (1970-2021).

Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1970	1976	15,143	0,378
1977	2007	17,452	0,925
2008	2009	14,500	0,707
2010	2014	17,400	1,140
2015	2021	19,714	0,756

L'analyse des tendances des jours avec précipitations jours chauds et très chauds montrent des tendances d'équilibre avec des coefficients de corrélation successifs très faibles ($r = 0,1272$; $r = 0,0031$ et $r = 0,1232$). Canicules enregistrées au cours des 52 dernières années (Figure IV-13) nous citons comme exemple : en 1972-1973 avec 116 jours de température ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et 35 jours de température élevée ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) et le nombre de jours de précipitations a légèrement augmenté avec 86 jours de pluie (Tableau IV-10).

Tableau IV-10 Nombre de jours de température ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$), nombre de jours de température élevée ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) et nombre de jours de pluie.

Année	$25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$	$T \geq 30^{\circ}\text{C}$	Nombre des jours de pluie
1972-1973	116	35	86
1986-1987	139	42	59
2010-2011	145	42	59
2014-2015	127	43	47

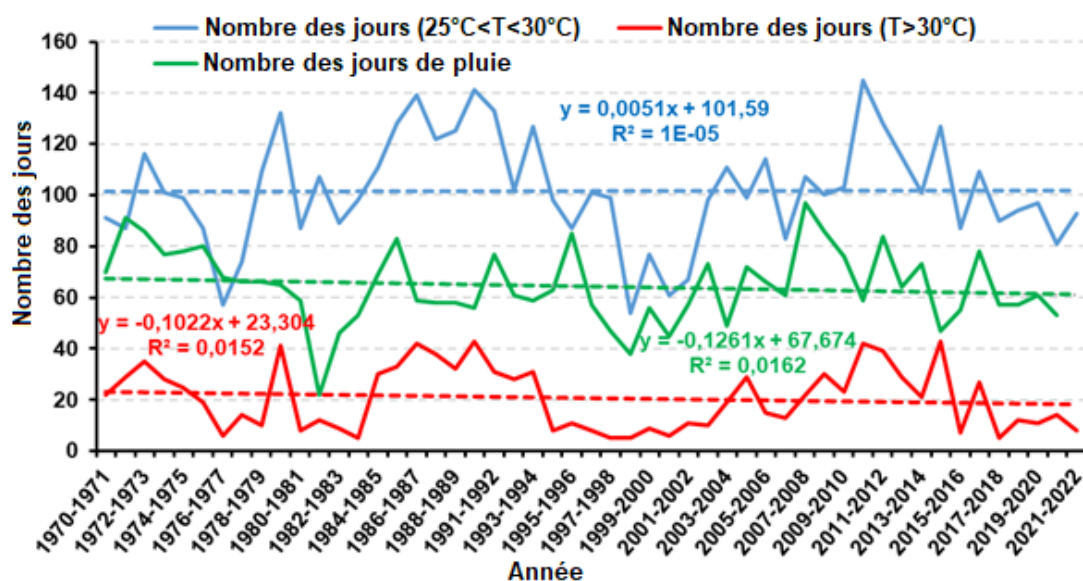


Figure IV-13 Nombre de jours de chaleur ($25^{\circ}\text{C} \leq T < 30^{\circ}\text{C}$) et de forte chaleur ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) et nombre de jours avec pluie (1970- 2021).

La détermination de SPI se fait sur une période de 1 à 2 mois pour une sécheresse météorologique, 1 à 6 mois pour une sécheresse agricole et 6 à 24 mois voire plus pour une sécheresse hydrologique. Parmi les buts de notre étude était d'évaluer la capacité des indicateurs de sécheresse météorologique (SPI et SPEI) à repérer et même à prédire les sécheresses agricoles et hydrologiques violentes.

IV- 4.6. Analyse de corrélation entre SPI et SPEI

Dans cette partie nous avons comparé l'indice SPI et l'indice SPEI à différentes échelles de temps qui ont les mêmes classifications sur la même période. Les résultats sont affichés sous forme de nuage de points corrélé. La figure IV- 14-a,14-b,14-c,14-d,14-e et 14-f montre les corrélations entre SPI et SPEI à différentes échelles de temps. Il existe une petite différence entre SPI et SPEI pour toutes les différentes échelles de temps (1,3,6,9,12 et 24 mois) dans la quantification de la sécheresse. La relation entre SPI et SPEI à différentes échelles est exprimée par des équations linéaires (IV-1,2,3,4,5 et IV-6) avec des coefficients de corrélation successifs : $r_1 = 0,61$; $r_3 = 0,52$; $r_6 = 0,56$; $r_9 = 0,50$; $r_{12} = 0,45$ et $r_{24} = 0,43$.

$$SPEI_1 = 0,6329 SPI_1 - 0,0031 \quad (IV-1)$$

$$SPEI_3 = 0,5097 SPI_3 + 0,0449 \quad (IV-2)$$

$$SPEI_6 = 0,554 SPI_6 - 0,0059 \quad (IV-3)$$

$$SPEI_9 = 0,4989 SPI_9 - 0,0079 \quad (IV-4)$$

$$SPEI_{12} = 0,4587 SPI_{12} + 0,0072 \quad (IV-5)$$

$$SPEI_{24} = 0,4454 SPI_{24} - 0,0015 \quad (IV-6)$$

Cependant, des différences entre les deux indicateurs au pas de temps de (1,3,6,9,12 et 24 mois) peuvent être observées en termes de gravité. La gravité de (SPI-12 mois) et (SPI-24 mois) est pire que celle de (SPEI-12 mois) et (SPEI-24 mois). Lorsque le SPI à différentes échelles de temps atteint des niveaux extrêmes (indice ≤ -2), le SPEI à différents pas de temps n'atteint que des niveaux modérés. On peut conclure que le (SPEI-12 mois) et le (SPEI-24 mois) peuvent expliquer la gravité de la sécheresse en termes d'intensité et de durée. En attendant, lorsque la température augmente, le SPI à différentes échelles est incapable de calculer l'impact de la hausse des températures sur la gravité de la sécheresse. Cela rend l'utilisation de la méthode SPI sous-optimale lors de l'analyse de la sécheresse dans les régions touchées par la hausse des températures.

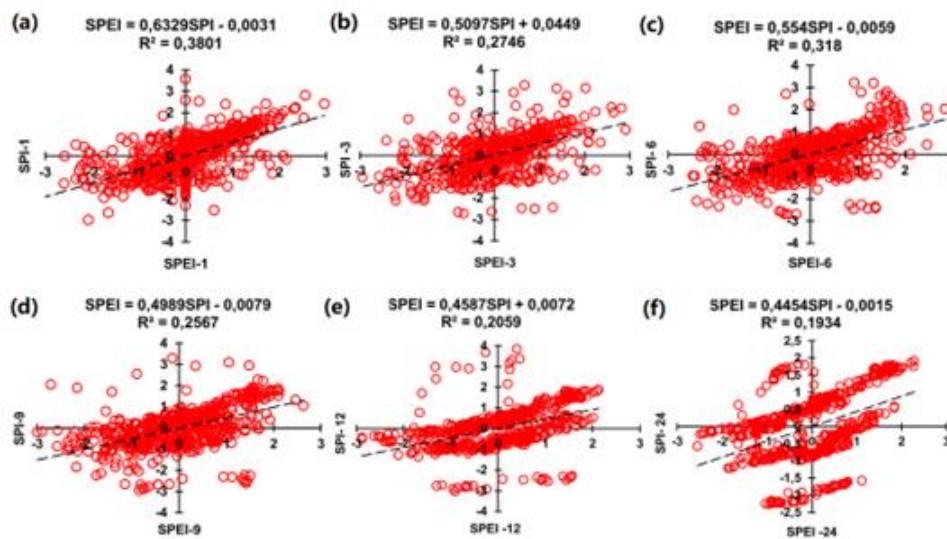


Figure IV-14 Relation entre le SPEI et le SPI (1970 à 2021) : (a) sur une échelle de 1 mois ; (b) sur une échelle de 3 mois ; (c) sur une échelle de 6 mois ; (d) sur une échelle de 9 mois ; (e) sur une échelle de 12 mois ; (f) sur une échelle de 24 mois.

IV- 4.7. Évaluation des sécheresses extrêmes

Différents travaux ont été entrepris pour élaborer des méthodes d'analyse et de suivi de la sécheresse. Dans cette catégorie, on utilise fréquemment des indicateurs objectifs, mais la définition subjective de la sécheresse rend extrêmement complexe la création d'un indicateur de sécheresse unique et universel. Les systèmes de précoce de la sécheresse sont la plupart du temps étudiés selon l'une des méthodes suivantes : Approche de l'indice de précipitation standard. Elle est basée sur une approche stochastique des précipitations. La plus couramment utilisée est le SPEI qui répond aux conditions de l'indice de sécheresse. Car sa nature multiscalaire lui permet d'être utilisé dans divers domaines scientifiques pour détecter surveiller et analyser les sécheresses similaires au SPI. Le SPEI mesure la gravité de la sécheresse en fonction de son intensité et de sa durée et peut identifier le début et la fin des épisodes de sécheresse.

Le SPEI est statistiquement robuste, facile à calculer et possède une méthodologie de calcul claire et facile à comprendre (Vicente-Serrano et al, 2010). La pertinence de la mise en œuvre de stratégies de gestion de la sécheresse à court, moyen et long terme, qui intègrent les évaluations des risques, des vulnérabilités et des risques de sécheresse, est essentielle pour renforcer la résilience d'une région face à de tels événements (Potopova et al, 2014 ; Sahana et al, 2021). Dans cette étude, une évaluation comparative des SPI et SPEI à plusieurs pas temps a été réalisée au cours de la période 1970-2021 pour déterminer la gravité de la sécheresse dans la région d'étude l'Oued Lakhdar. Les analyses des variations du SPI et du SPEI aux échelles de temps de 1, 3, 6, 9, 12 et 24 mois sont présentés dans les figures IV-15-a, 15-b, 15-c, 15-d, 15-e et 15-f.

Le calcul de l'indice normalisé des précipitations SPI et de l'indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations SPEI montre que les grandes valeurs enregistrées représentant des années humides se situent dans les plages consécutives suivantes : 0,5 à 2,4 pour le SPI et 0,5 à 1 pour le SPEI. Les années les plus humides ont été 1972, 1978, 1997, 1998, 2009, 2010, 2013 et 2014. Les grandes valeurs déterminées comme représentant des années extrêmement sèches se situent entre : -0,8 et -2,5 pour le SPI et -0,6 et -1,1 pour le SPEI. Les années les plus sèches ont été 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 1990, 1995, 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2017, 2020 et 2021.

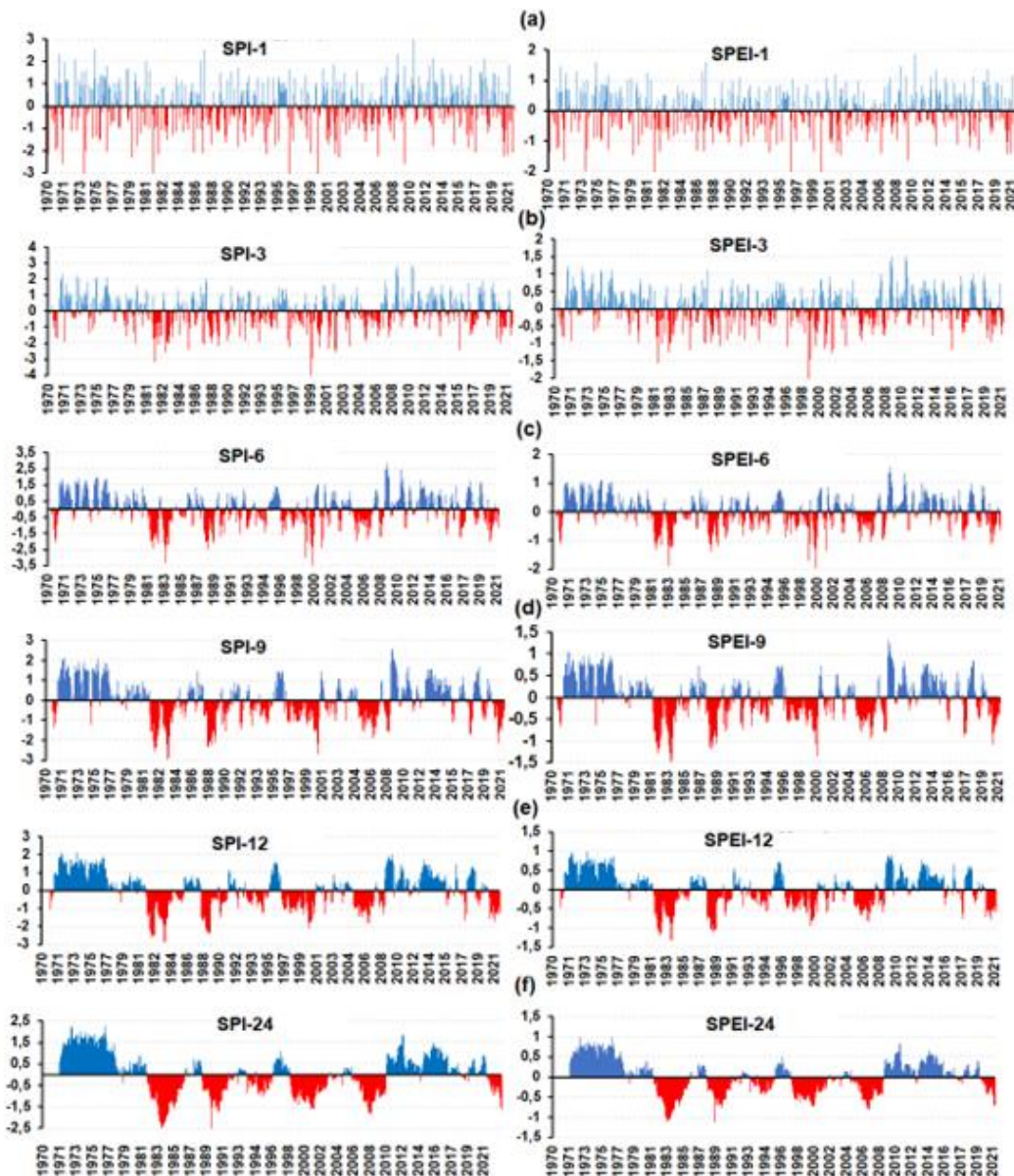


Figure IV-15 Variations du SPI et du SPEI (1970 à 2021) : (a) sur une échelle de 1 mois ; (b) sur une échelle de 3 mois ; (c) sur une échelle de 6 mois ; (d) sur une échelle de 9 mois ; (e) sur une échelle de 12 mois ; (f) sur une échelle de 24 mois.

IV- 4.8. Analyse de fréquence

Les catégories SPI et SPEI à différentes échelles peuvent être égales comme indiqué dans le tableau IV-11.

Tableau IV-11 Catégories SPI et SPEI (égalisées) à différentes échelles.

Catégorie	SPI	SPEI-1	SPEI-3	SPEI-6	SPEI-9	SPEI-12	SPEI-24
Extrêmement humide	$\geq 2,00$	$\geq 1,26$	$\geq 1,06$	$\geq 1,12$	$\geq 0,99$	$\geq 0,93$	$\geq 0,89$
Gravité humide	1,5 à 1,99	0,94 à 1,25	0,81 à 1,05	0,84 à 1,11	0,74 à 0,98	0,69 à 0,92	0,67 à 0,88
Modérément humide	1,00 à 1,49	0,62 à 0,93	0,46 à 0,80	0,56 à 0,83	0,49 à 0,73	0,47 à 0,68	0,44 à 0,66
Près de la normale	-0,99 à 0,99	-0,62 à 0,62	-0,45 à 0,45	-0,55 à 0,55	-0,48 à 0,48	-0,46 à 0,46	-0,43 à 0,43
Modérément sec	-1,00 à -1,49	-0,62 à -0,93	-0,46 à -0,80	-0,56 à -0,83	-0,49 à -0,73	-0,47 à -0,68	-0,44 à -0,66
Sévérité sèche	-1,50 à -1,99	-0,94 à -1,25	-0,81 à -1,05	-0,84 à -1,11	-0,74 à -0,98	-0,69 à -0,92	-0,67 à -0,88
Extrêmement sec	$\leq -2,00$	$\leq -1,26$	$\leq -1,06$	$\leq -1,12$	$\leq -0,99$	$\leq -0,93$	$\leq -0,89$

Une des différences entre le SPI et le SPEI aux différents pas de temps est la fréquence des épisodes de sécheresse extrême, sévère et modérée. L'étude montre clairement que les épisodes de sécheresse et d'inondation sur une période de 52 ans sont influencés par le changement climatique. Le calcul de l'indice standardisé de précipitations SPI et de l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations SPEI notamment aux pas de temps de 6,9,12 et 24 mois montre que les pourcentages légèrement faibles enregistrés dans les années humides sont de l'ordre de 1% à 4% pour le SPI aux différents pas de temps et de 1% à 3% pour le SPEI aux différents pas de temps pour le cas de conditions très humides. Les pourcentages élevés concernant le cas des sécheresses modérées sont compris entre 7% et 14% pour le SPI et le SPEI aux pas de temps de 1,3, 6, 9, 12 et 24 mois. On remarque clairement pour 52 ans que les années sèches (sécheresse) sont beaucoup plus nombreuses que les années humides (inondations), (Figure IV-16).

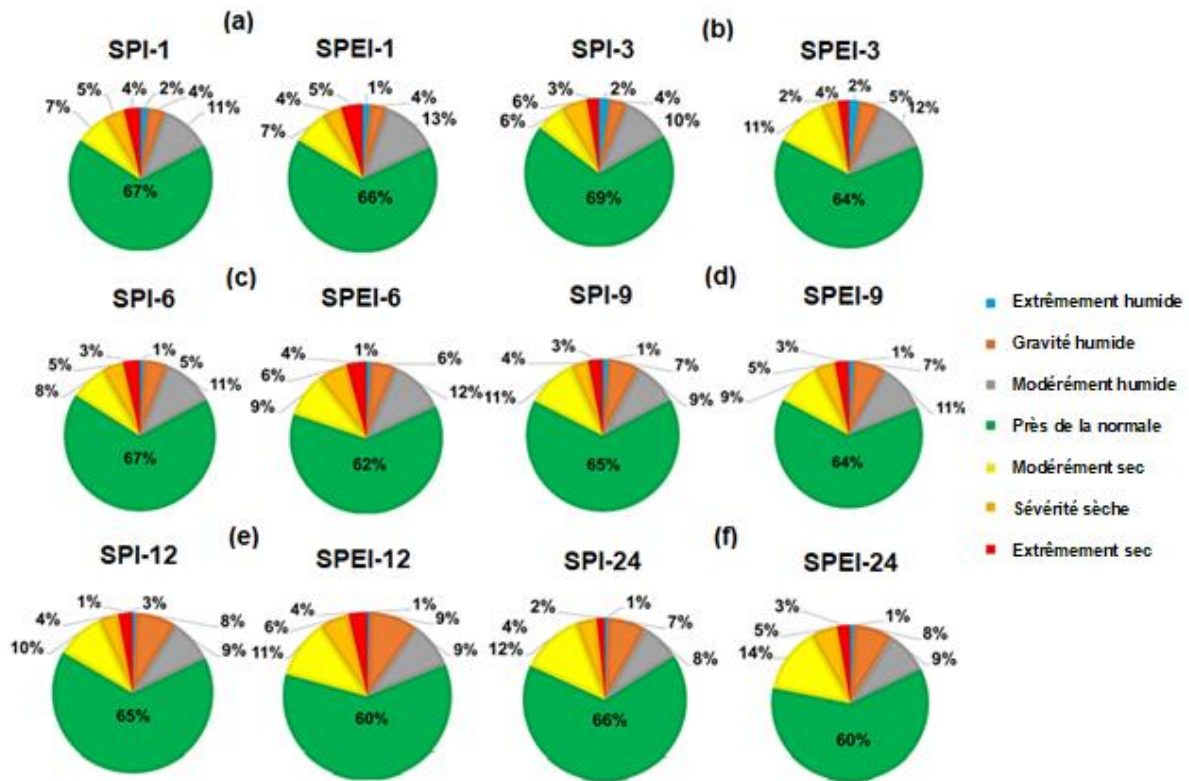


Figure IV-16 Fréquences des catégories d'événements de sécheresse extrêmes, sévères et modérés pour (SPI) et (SPEI) sur différentes échelles de temps (1970 à 2021).

Il y a peu de changement sur une période de 52 ans entre le SPI et le SPEI à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 9, 12 et 24). Une comparaison a été faite entre le SPEI au SPI et montrons que les indicateurs SPEI produisent des résultats légèrement différents du SPI en termes de variabilité mensuelle, saisonnière et annuelle dans les conditions climatiques actuelles et des fluctuations de température légèrement plus élevées. Nous concluons que la prise en compte de l'évapotranspiration (SPEI) fournit plus d'informations dans les régions à fortes fluctuations interannuelles de température, tout en confirmant que les sécheresses sont principalement causées par des déficits pluviométriques. Cependant, le SPEI s'est récemment montré plus efficace que le SPI pour détecter les sécheresses agricoles et hydrologiques. L'évapotranspiration est considérée comme d'une importance cruciale dans l'étude des réponses à la sécheresse dans le climat actuel, car la diminution des précipitations et l'augmentation de la température jouent un rôle important. Deuxièmement, le SPI, qui s'appuie uniquement sur les données de précipitations, est moins efficace que le SPEI pour détecter les sécheresses récentes à différentes échelles de temps et en particulier pour les sécheresses de longue durée (12 et 24 mois). Il est donc important d'examiner la réponse de l'indice au changement climatique. La corrélation temporelle effectuée ci-dessus considère l'ensemble des séries de chaque variable. C'est la première indication qui a permis de déterminer les pas de temps les plus adaptés aux sécheresses considérées, mais elle mérite d'être complétée par des études plus détaillées, en mettant un accent particulier sur les valeurs des phénomènes météorologiques extrêmes tels que la sécheresse et les inondations. Bien que nous n'ayons pas trouvé d'études scientifiques similaires dans notre zone d'étude

pour comparer nos résultats sur l'impact du changement climatique sur l'intensité de la sécheresse et des inondations dans la zone d'étude, tout comme nos résultats nous pouvons globalement les comparer avec d'autres études scientifiques réalisées dans le Nord-Ouest algérien.

Otmane et al, (2018) ont étudié la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Mekerra (nord-ouest de l'Algérie) à travers le prisme du changement climatique. Leur analyse des données de précipitations et de ruissellement sur 30 ans a révélé des diminutions par rapport à la décennie précédente (1968-1978). L'indice standardisé des précipitations a également montré une augmentation des sécheresses modérées dans la zone d'étude (41 % à 50 %). De plus, l'indice d'humidité climatique a indiqué une tendance significative à l'assèchement depuis la fin des années 1970, *(2020)* ont étudié la réponse hydrologique au changement climatique dans trois grands fleuves du nord-ouest algérien : Cheliff, Tafna et Macta. Leurs conclusions, basées sur les tendances observées, ont mis en évidence une diminution significative du ruissellement mensuel entre 1970 et 1999.

Mathbout et al, (2018) ont observé une augmentation de la gravité et de la durée des sécheresses avec des échelles de temps plus longues. De plus, le SPEI a identifié des sécheresses plus graves et plus longues que le SPI. Nos résultats font écho à ces observations, montrant une tendance similaire à l'augmentation de la durée et de la gravité des sécheresses avec des échelles de temps plus longues, et le SPEI indiquant des sécheresses plus intenses et plus prolongées que le SPI. *Pei et al, (2020)* ont étudié le comportement du SPI et du SPEI sur plusieurs pas de temps (1, 3, 6 et 12 mois) en Mongolie intérieure (1981-2018). Ils ont signalé une cohérence croissante des fluctuations temporelles entre le SPI et le SPEI à mesure que l'échelle de temps augmentait. En revanche, notre étude dans une région plus vaste a révélé des différences dans les caractéristiques de la sécheresse entre les deux indices au fil du temps (*Balbo et al,2019*).

IV- 5. Les tests pour les valeurs extrêmes de température annuelle

IV- 5.1. Test de Dixon pour les valeurs extrêmes de température annuelle

Hypothèse alternative : Bilatérale ; Niveau de signification (%) : 5 ; Itérations : Maximum : 1 ; Nombre de simulations : 1000000 ; Test de Dixon pour les valeurs extrêmes / Test bilatéral : R_{10} (Valeur observée) : 0,069 ; R_{10} (Valeur critique) : 0,253 ; Valeur de p (bilatérale) : 0,967 ; alpha : 0,05 ; La valeur de p a été calculée à l'aide de 1000000 simulations de Monte Carlo, Intervalle de confiance à 99 % autour de la valeur de p :] 0,967 ; 0,968 [; H_0 : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données ; H_a : Le minimum ou le maximum est une valeur extrême ; étant donné que la valeur p calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 même si elle est vraie est de 96,72 % (Figure IV-17).

IV- 5.2. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes de température annuelle

Hypothèse alternative : Bilatérale. Niveau de signification (%) : 5. Itérations : Maximum : 1. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes / Test bilatéral : G (Valeur observée) : 2,160. G (Valeur critique) :

3,144. Valeur P (bilatérale) : 0,562. Alpha : 0,05. Intervalle de confiance à 99 % autour de la Valeur P :] 0,560 ; 0,563 [; H_0 : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données ; H_a : Le minimum ou le maximum est une valeur extrême. Étant donné que la valeur P calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est de 56,15 % (Figure IV-17).

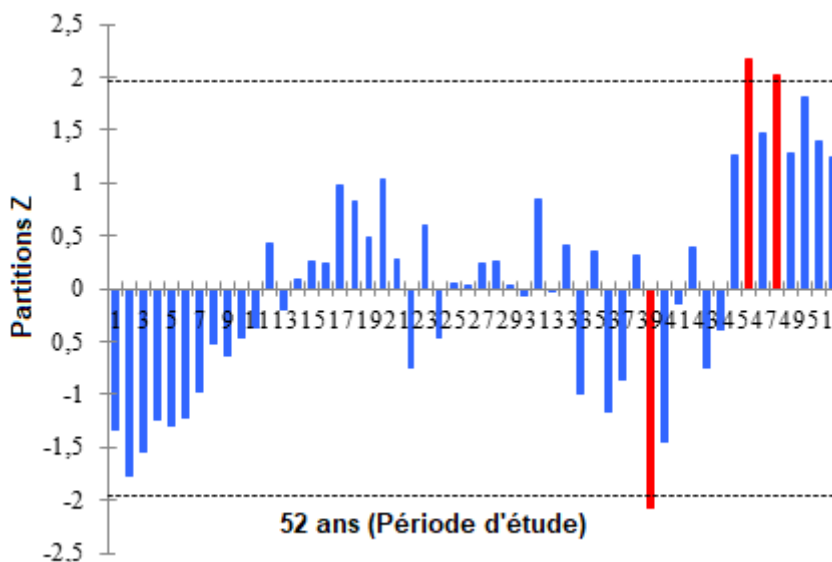


Figure IV-17 Test de Dixon et test de Grubbs pour les valeurs extrêmes de température annuelle (1970-2021).

IV- 6. Tests pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles

IV- 6.1. Test de Dixon pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles

Hypothèse alternative : Bilatérale. Niveau de signification (%) : 5. Itérations : Maximum : 1. Nombre de simulations : 1000000. Test de Dixon pour les valeurs extrêmes / Test bilatéral : R_{10} (Valeur observée) : 0,142 ; R_{10} (Valeur critique) : 0,253. Valeur de p (bilatérale) : 0,367. Alpha 0,05. La valeur de p a été calculée en utilisant 1000000 simulations de Monte Carlo. Intervalle de confiance à 99 % autour de la valeur de p :] 0,366 ; 0,368 [; H_0 : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données. H_a : Le minimum ou le maximum est une valeur extrême. Étant donné que la valeur de p calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 bien qu'elle soit vraie est de 36,69 % (Figure IV-18).

IV- 6.2. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles

Hypothèse alternative : Bilatérale. Niveau de signification (%) : 5. Itérations : Maximum. Test de Grubbs pour les valeurs extrêmes / Test bilatéral : G (Valeur observée) : 2,323. G (Valeur critique) : 3,144.

Valeur de p (bilatérale) : 0,907. Alpha : 0,05. Intervalle de confiance à 99 % autour de la valeur de p :] 0,906 ; 0,908 [; H_0 : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données. H_a : Le minimum ou le maximum est une valeur extrême. Étant donné que la valeur de p calculée est supérieure au seuil de signification $\alpha=0,05$, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 même si elle est vraie est de 90,70 % (Figure IV-18).

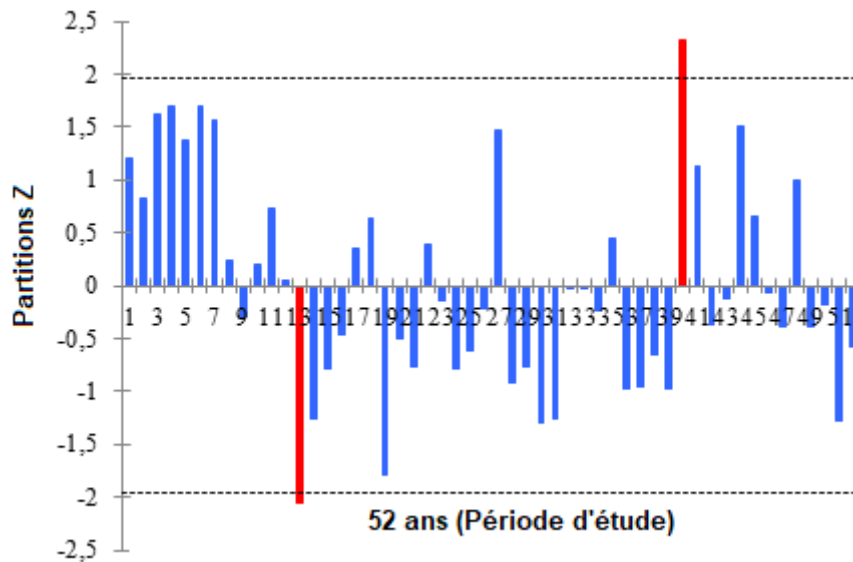


Figure IV-18 Test de Dixon et test de Grubbs pour les valeurs extrêmes des précipitations annuelles (1970-2021).

Ce chapitre souligne l'importance des investissements proactifs dans les systèmes d'information, les institutions et les infrastructures pour renforcer la résilience face aux événements météorologiques extrêmes comme les inondations et les sécheresses. Plus précisément, les pays devraient considérer les systèmes d'alerte précoce ; développer des systèmes robustes de surveillance et d'alerte précoce pour les inondations et les sécheresses ; gouvernance et planification : établir des institutions et des cadres de planification solides, potentiellement par le biais d'une législation spécifique aux inondations et aux sécheresses ; investissements coordonnés : mettre en œuvre une planification coordonnée à différents niveaux, englobant à la fois des mesures d'urgence à court terme et des investissements à long terme pour atténuer l'impact des inondations et des sécheresses extrêmes.

Conclusion

Dans le cadre du changement climatique, les sécheresses et les inondations ont des répercussions sociétales et environnementales importantes, ce qui incite à la recherche sur les stratégies de gestion, les risques associés et les crises qui en découlent. Ce chapitre vise à démontrer l'occurrence historique des sécheresses et des inondations et leurs effets sur l'agriculture et l'environnement. Afin de mettre en œuvre diverses contre-mesures, telles que les systèmes d'alerte précoce en cas d'épidémie ou de sécheresse, la surveillance et la planification d'urgence, des indices qui sont désormais des outils précieux ont été utilisés. Ces indicateurs représentent une méthode pratique pour convertir des données en informations, ce qui peut être utilisé dans des domaines tels que la prévision des sécheresses et des inondations, la communication de la gravité de ces phénomènes et la sensibilisation du public aux conséquences potentielles des sécheresses et des inondations. La sensibilisation accrue du public à ces implications et aux conséquences anticipées constitue l'avantage social de l'étude. Notre chapitre est basé sur l'analyse de l'impact de la température et des précipitations sur les sécheresses et les inondations extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar situé au Nord-Ouest de l'Algérie.

Nous avons effectué des calculs pour évaluer les sécheresses extrêmes en utilisant l'indice de précipitations standardisé (SPI) et l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI) à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 9, 12 et 24 mois). L'application des indices de sécheresse SPI et SPEI montre que les années humides ont été 1972, 1978, 1997, 1998, 2009, 2010, 2013 et 2014 et les années sèches ont été 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 1990, 1995, 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2020 et 2021.

Chapitre V

Hydrologie et transport solide dans la zone d'étude

Introduction

L'étude des conséquences de la variation de climat sur le secteur hydrologique ou des événements tels que la dégradation de sol et le déplacement des particules solides nécessite une connaissance approfondie des conditions météorologiques. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire de mesurer et d'évaluer tous les éléments engagés dans le phénomène hydrologique. La hauteur d'eau des précipitations est un facteur déterminant de l'abondance des pluies annuelles et saisonnières. En outre, en fonction de leur volume quotidien, il est possible de distinguer les averses qui engendrent des crues et des sédiments.

Il est essentiel d'effectuer une analyse hydro-climatique pour comprendre le comportement hydrologique des rivières. En Algérie, avec la majorité des précipitations provenant du front, la tranche annuelle augmente en fonction de l'altitude dans une zone spécifique (Belloum, 1993).

La morphologie de la nature, sous l'influence de phénomène naturel tel que l'eau, de la glace et des vagues, implique des processus tels que la dégradation des terres, le déplacement de matériaux solides et l'envasement (Breton, 2004).

Notre recherche se compose de deux axes distincts. Le premier axe vise à évaluer quantitativement l'hydrologie et à évaluer la dégradation de sol en utilisant la technique de cartographie dans la région d'étude et en deuxième axe, il a été concentré sur la détermination du flux sédimentaire en utilisant des valeurs instantanées des débits liquides Q_L et des débits solides en suspension Q_S .

V - 1. Variabilité des précipitations

Dans les zones semi-arides, le climat est agressif (Khezazna, 2017 ; Hallouz et al., 2019 ; Djellouli et al., 2019 ; Zitoun, 2019 ; Chourghal et Boukhalfa, 2020 ; Benoit, 2024) et les forts orages sont fréquents en saison d'automne.

Durant cette saison où l'on assiste à une absence de couverture végétale, les crues à forts débits sont brèves et dévastatrices. Elles sont générées par des pluies généralement localisées et intenses. Les flux solides exportés à l'exutoire sont alors très élevés (Yles et Bouanani, 2017).

Les données fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) sont les valeurs des précipitations enregistrés entre 1970 et 2021 par la station hydro-pluviométrique situé dans le bassin versant d'Oued Lakhdar. La Localisation de la station hydro-pluviométrique d'Oued Lakhdar (Ex-Chouly) qui fournit les données des précipitations et des débits et la station météorologique de Meffrouche pour les températures sont illustrées dans la figure V-1.

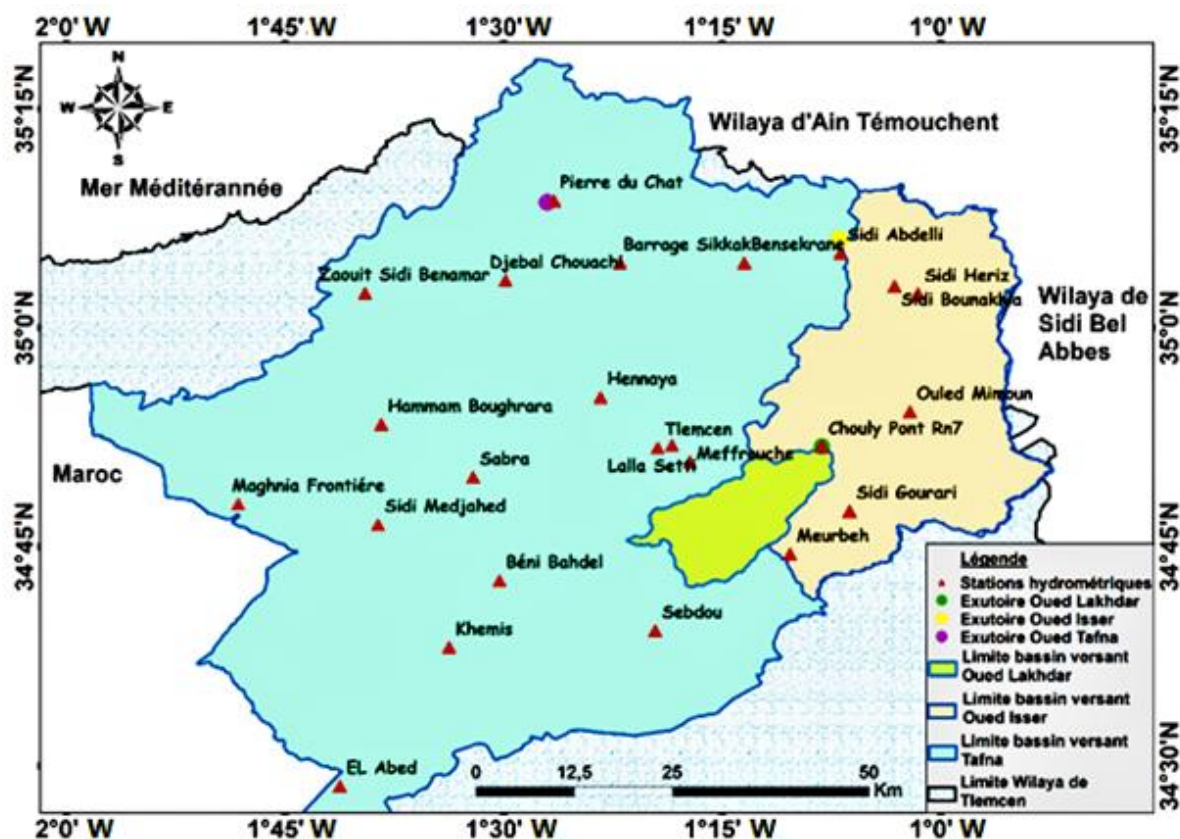


Figure V-1 Situation des stations de jaugeage dans la région de la Tafna.

Le tableau V-1 présente les informations et les caractéristiques hydro-pluviométriques de la station (code 160601) de l'Oued Lakhdar.

Tableau V-1 Les Coordonnées de la station hydro-pluviométrique d'Oued Lakhdar.

Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Site d'implantation	Période d'observation	Paramètres calculer
Chouly	160601	1° 8' 5 W	34° 51' 52 N	722	Oued Lakhdar	1970-2021	Précipitation

Au cours de la période d'observation entre 1970-2021, on observe une tendance générale à la diminution des précipitations annuelles (Figure V- 2-a), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 0,48$). Les variations saisonnières des pluies (1970-2021) sont présentées dans la figure V- 2-b. Les précipitations mensuelles observées sur 52 ans sont illustré dans la figure V-2-c. L'analyse des précipitations mensuelles montre une diminution. Les précipitations journalières (1970-2021) montrent une irrégularité des apports pluviométriques d'un jour à l'autre (Figure V-2-d).

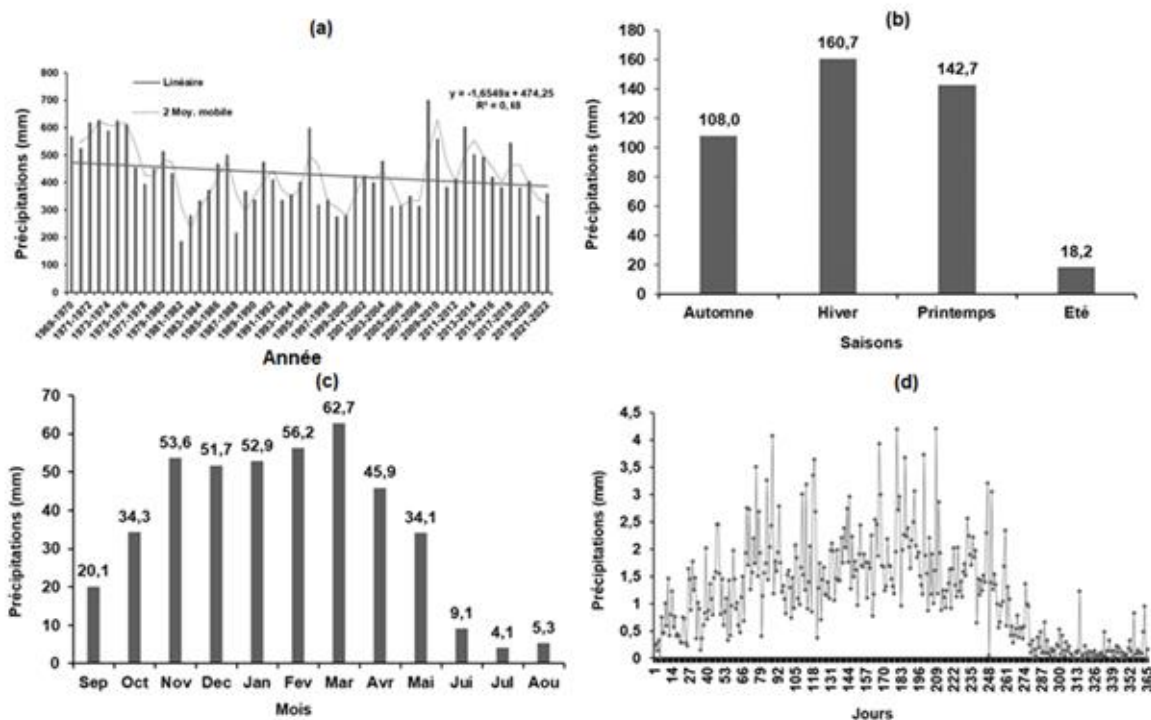


Figure V-2 (a) Variation interannuelle des précipitations (1970-2021) ; (b) Variation saisonnière des précipitations (1970-2021) ; (c) Variation mensuelle moyenne des ondes d'eau précipitées (1970-2021) ; (d) Variation journalière moyenne des précipitations dans le bassin versant de Wadi Lakhdar au cours de la période (1970-2021).

V- 2. Variabilité de température

La température joue un rôle important dans la détermination du climat. Les données climatiques journalières, mensuelles, saisonnière et annuelles sur une période de 52 ans de station météorologique située dans le bassin versant de Mefrouche juste à côté de notre zone d'étude, à cause de l'absence des données de température dans notre zone d'étude.

Pour observer la température, on a utilisé les données climatiques d'une station météorologique située dans le bassin versant de Mefrouche, juste à côté de notre zone d'étude à cause d'absence des données climatiques dans la région d'étude. Les coordonnées de poste météorologique de Mefrouche se trouvent dans le tableau V-2.

Tableau V-2 Les Coordonnées de la station météorologique de Mefrouche.

Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Site d'implantation	Période d'observation	Paramètre calculer
Mefrouche	160701	1°17	34°50	1110	Barrage Mefrouche	1970-2021	Température

La température joue un rôle important dans la détermination du climat, Données climatiques journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles sur une période de 52 ans provenant d'une station météorologique située dans le bassin versant de la Mefrouche juste à côté de notre zone d'étude du bassin versant de l'Oued Lakhdar, en raison de l'absence de données de température dans notre zone d'étude. Le bassin versant de l'Oued Lakhdar connaît un climat semi-aride avec des précipitations et des températures variables. Il reçoit une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 401 mm. La température moyenne maximale quotidienne est d'environ 21°C, tandis que la température minimale moyenne est de 15°C.

Pour observer la température, nous avons utilisé les données climatiques d'une station météorologique située dans le bassin versant de la Mefrouche, juste à côté de notre zone d'étude en raison de l'absence de données climatiques dans la région d'étude. La variation des températures annuelles au cours de la période d'observation entre 1970-2021 (Figure V-3-a). La figure montre un signe d'irrégularité d'une année à l'autre en raison des phénomènes de sécheresse et de changement climatique qui frappent la région nord-africaine. La valeur moyenne annuelle de la température est de 16,9 °C. La variation des températures annuelles au cours de la période d'observation entre 1970-2021 (Figure V-3-a) montre une tendance légèrement à la hausse avec un coefficient de corrélation très faible ($R^2 = 0,28$), ceci est un signe d'irrégularité d'une année à l'autre en raison des phénomènes de sécheresse et de changement climatique qui frappent la région nord-africaine. L'analyse de la variation saisonnière des températures de 1970 à 2021 est présentée dans (Figure IV-3-b). Les analyses des températures mensuelles sont illustrées dans la figure IV- 3-c. Les températures journalières entre 1970 et 2021 sont présenté dans la figure IV-3-d.

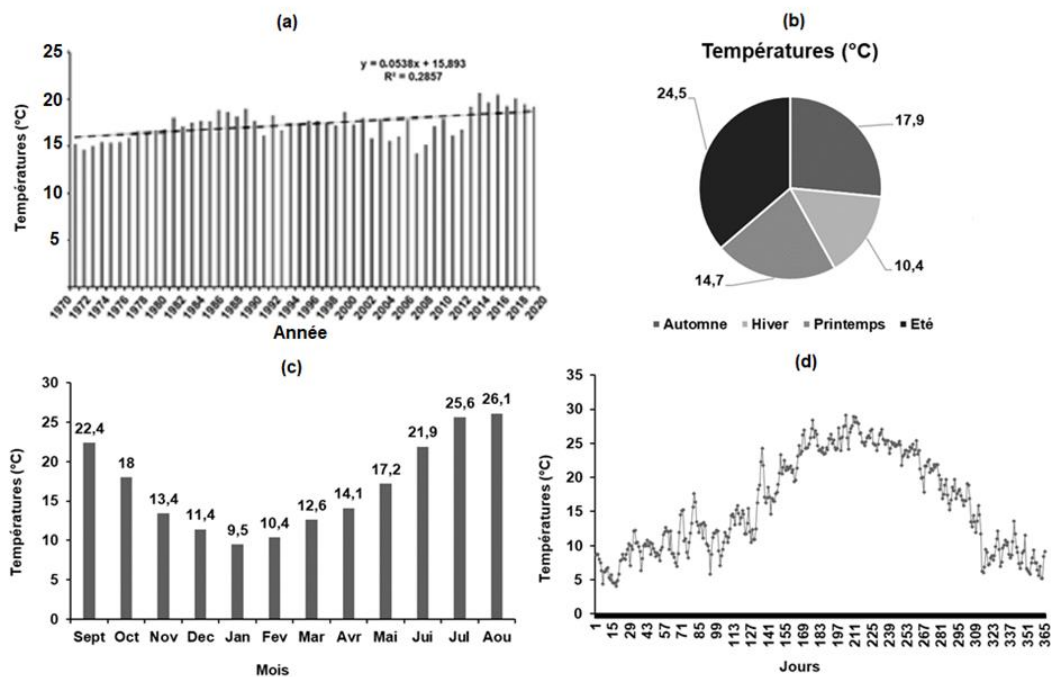


Figure V-3 (a) Variation annuelle moyenne de la température (1970-2021) ; (b) Variation saisonnière moyenne de la température (1970-2021) ; (c) Variation mensuelle moyenne de la température (1970-2021) ; (d) Variation journalière moyenne des températures (1970-2021).

V - 3. Variabilité de débit

Pour la quantification du flux sédimentaire en exploitant des valeurs instantanées des débits liquides Q_L et des débits solides en suspension Q_S , on a exploité les données instantanées des débits liquides Q_L et des concentrations C mesurées à l'exutoire de bassin versant par une station hydrométrique de Chouly située dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar pour la période de (1970-2021) et fournies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH), (Tableau V-3).

Tableau V-3 Les Coordonnées de station hydrométrique utilisée.

Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Site d'implantation	Période d'observation	Paramètres calculer
Chouly	160601	1° 8' 5 W	34° 51' 52 N	722	Oued Lakhdar	1970-2021	Concentration
						1970-2021	Débit liquide
						1970-2021	Débit solide

V- 3.1. Apports liquides

Le volume annuel moyen de liquide transporté par l'oued Lakhdar a été évalué à 8 486 Hm³. L'année 2008-2009 a été l'année qui a apporté la plus grande contribution solide (16 294 t) de toute la série d'étude (1970-2021). L'étude de l'évolution annuelle des apports liquides montre une tendance globale à la baisse (figure V-4-a) avec un coefficient de corrélation très faible ($R^2 = 0,11$) ; sachant que le débit maximal annuel ($Q_{\text{max}} \text{ annuelle} = 1,02 \text{ m}^3/\text{s}$) enregistré en 2008-2009 dépassant la moyenne annuelle ($Q_{\text{moy}} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$). Notons aussi que le débit annuel minimum est égale à 0,02 m³/s. Le volume moyen saisonnier maximal de liquide transporté par l'Oued Lakhdar a été mesuré au printemps avec 4,12 Hm³, tandis qu'il a été enregistré un minimum de 0,51 Hm³ en été. En hiver pour le printemps, soit 36 et 49% par rapport à celui de l'automne (9%), (figure V-4-b). L'apport hydrique mensuel moyen véhiculé par l'Oued Lakhdar a été estimé à 0,71 Hm³ avec un apport hydrique mensuel moyen maximum enregistré au mois de mars égal à 2,37 Hm³ et un minimum de 0,12 Hm³ au mois d'août (figure V-4-c). Les dégradations spécifiques ont été irrégulières et cela est dû à la variabilité spatio-temporelle des précipitations. L'analyse des apports liquide mensuelle montre une augmentation au mois de février et mars et une diminution à la saison estivale. Cette faiblesse est principalement due à la fluctuation mensuelle irrégulière des pluviométries d'un mois à l'autre, par exemple, des valeurs moyennes d'environ 62 mm a été enregistré dans le mois de mars et de 4 mm au mois de juillet, ce qui se reflète probablement sur les flux mensuels de ruissellement et de sédiments. La variation des débits journaliers moyens au cours de la période d'observation entre 1970-2021 (Figure V-4-d) montre une irrégularité d'un jour à l'autre. L'observation des variations moyennes journalières des débits montre une perturbation pendant toute l'année avec un débit maximal égal à 2.2 m³/s et un minimal égal à 0.04 m³/s.

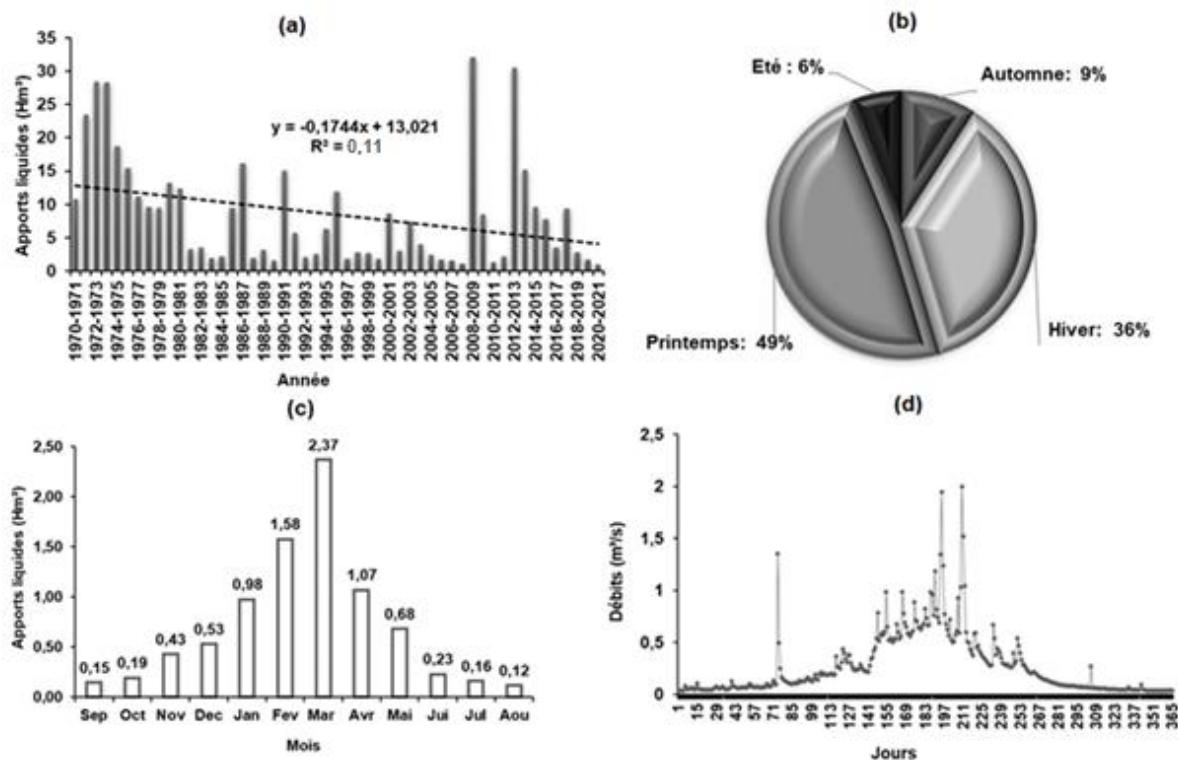


Figure V-4 (a) Débits interannuelles dans la région d'étude ; (b) Variation saisonnière moyenne des débits ; (c) Variation mensuelle moyenne des débits ; (d) Variation journalière moyenne des débits (1970-2021).

V- 4. Evaluation quantitative de l'érosion hydrique par les techniques spatiales

La détérioration des terres causée par l'érosion est un enjeu majeur que rencontrent la plupart des pays du monde entier. L'accroissement de la population et l'élévation du standard de vie ont provoqué une demande grandissante pour les aliments, l'eau et le logement. L'augmentation constante de la demande, où la production des écosystèmes est souvent supérieure aux besoins des populations, a incité l'homme à adopter des comportements inadaptés qui ont perturbé les équilibres naturels et provoqué une érosion rapide. Chaque année, elle affecte de plus en plus le sol, diminuant parfois leur aptitude à produire et les rendant complètement inappropriés. Plus de dix millions d'hectares subissent une détérioration annuelle, principalement due à l'érosion hydrique. On trouve plusieurs travaux au monde sur l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique par les techniques spatiales, on cite à titre d'exemple : ([Ganasri et Ramesh,2016](#) ; [Yaméogo et al,2021](#) ; [Gbadamassi et al,2022](#)).

Différentes études ont été menées au Maghreb afin d'analyser le phénomène de l'érosion par les techniques spatiales, on cite ceux de : ([Zaher et al,2021](#) ; [Tribak et al,2021](#) ; [Ennassiri et Mouak ,2021](#) ; [Mazouzi et al,2021](#) ; [Khemiri et Jebari,2021](#) ; [Nouaim et al,2023](#) ; [Benhouma et al,2024](#) ; [Meghraoui et al,2024](#)).

En Algérie, l'érosion hydrique a provoqué la détérioration de 45% des territoires telliens, soit 12 millions d'hectares ([Chebbani et al., 1999](#)). En Algérie, plusieurs recherches ont été menées sur l'évaluation

quantitative de l'érosion hydrique en utilisant des méthodes spatiales, on cite à titre d'exemple : ([Mostephaoui et al,2013](#) ; [Toumi et al,2013](#) ; [Guidoum,2017](#) ; [Bouhadeb,2019](#) ; [Meghraoui,2019](#) ; [Millares et al,2020](#) ; [Bensekhria et Bouhata,2022](#)).

Plusieurs chercheurs ont examiné la résistance des terres face à l'érosion hydrique en utilisant les techniques spatiales dans divers bassins versants situés à proximité de notre zone d'étude. Cependant, nous n'avons pas trouvé des études consacrées au bassin versant d'Oued Lakhdar. Des études concernant des bassins versants à proximité de notre zone d'étude ont été menées pour estimer quantitativement l'érosion hydrique en utilisant les techniques spatiales, comme en témoignent les exemples suivants : ([Mankouri,2009](#) ; [Zobiri,2010](#) ; [Beneddine ,2012](#) ; [Zettam et al ,2017](#) ; [Kazi ,2019](#) ; [Meghraoui ,2019](#) ; [Boughalem et al, 2020](#) ; [Millares et al,2020](#) ; [Zekri et Tounkob, 2021](#)).

V- 4.1. Méthode RUSLE

Il y a différentes formules de dégradation des terres avec des niveaux de difficulté différents. Le modèle mathématique le plus simple est l'équation (USLE), largement utilisée dans le monde depuis les années 1960. On utilise un modèle empirique nommé USLE afin d'évaluer la dégradation des terres annuelle. Elle est encore utilisée dans de nombreuses études sur la dégradation du sol avec sa version mise à jour RUSLE ([Fistikoglu et Hamancioglu, 2002](#)).

L'équation universelle des pertes de sol est composée de cinq facteurs principaux ([Wischmeier et Smith, 1965](#)). Elle prévoit les pertes moyennes de sol sur le terrain, liées à l'érosion de la surface.

L'équation a été intégrée dans le système d'information géographique afin d'accéder à une modélisation et une cartographie exhaustive du processus érosif, en utilisant les données de télédétection et la méthode du système d'information géographique. L'équation prend en considération cinq facteurs pour calculer les pertes de sol (E) : dont le schéma est le suivant (équation V-1) :

$$E = R. K. LS. C. P \quad (V-1)$$

E : Le taux annuel de perte de sol en tonnes par hectare par an est le résultat de cinq facteurs d'érosion, à savoir ;

R : Le facteur de l'érosivité des pluies, qui représente la moyenne annuelle des produits de l'énergie cinétique de la pluie en 30 minutes consécutives, est exprimé en MJ. mm / ha. H. an.

K : L'érodibilité des sols est influencée par la granulométrie, la quantité de matière organique, la perméabilité et la structure du sol. Elle est exprimée en tonnes par hectare H / hectare MJ. mm.

LS : étant donné que l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m) sont deux facteurs ;

C : Impact du revêtement végétal ;

P : étant un élément non dimensionnel, qui prend en considération les méthodes de culture antiérosives comme le labour en courbes de niveau.

Chacun de ces éléments a été représenté à travers une carte thématique, dont l'ensemble permet de créer la carte des pertes en sol selon l'organigramme ci-dessous (Figure V-5).

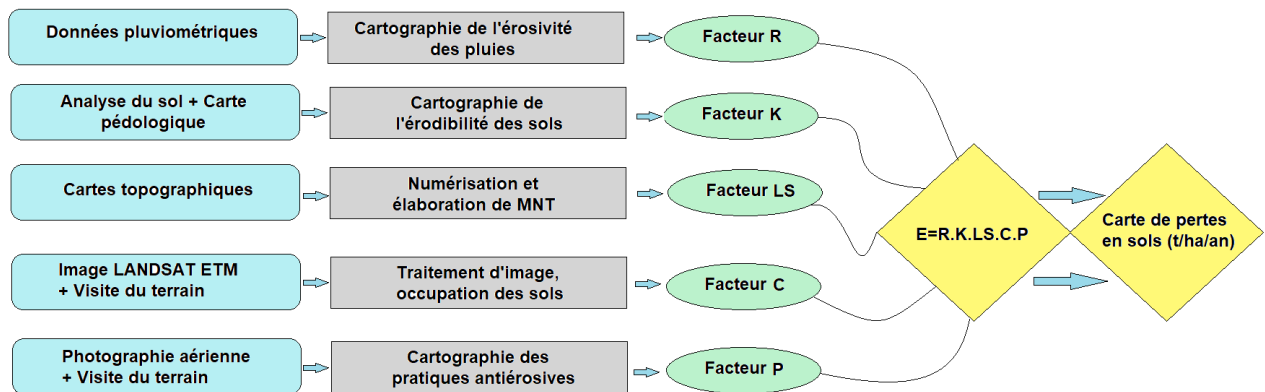


Figure V-5 Diagramme de l'approche utilisée.

Cette recherche a été réalisée en se basant sur les instruments suivants : les systèmes d'information géographique (SIG) (Arc GIS 10 et Mapinfo11). L'image LANDSAT 8 (30 m x 30 m) datant de novembre 2021 (Mois marqué par une forte activité d'érosion) et le MNT de la zone examinée sont présents.

La carte de sensibilité à l'érosion hydrique est le produit d'une combinaison entre la carte d'érodibilité et celle du sol. La carte d'érodibilité combine la carte des pentes (obtenue à partir du MNT) et celle du litho faciès (élaborée en se basant sur les informations géologiques, lithologiques et pédologiques).

On a réalisé la carte du sol en utilisant la carte d'occupation du sol (extraite du classement supervisé de l'image satellitaire Landsat 8, vérifiée et complétée par les informations recueillies auprès des forêts conservées dans la wilaya de Tlemcen et des observations sur site) à la carte du couvert végétal (élaborée selon l'indice de végétation normalisé NDVI, le plus fréquemment employé pour déterminer les étapes de croissance de la végétation verte grâce aux données multispectrales de télédétection et dans le processus d'étude et de cartographie de la végétation).

V- 4.1.1. Détermination des paramètres d'érosion

V- 4.1.1.1. Facteur d'érosivité des pluies (R)

Selon *Van Doren et Bartelli en 1956*, la formule de dégradation des terres était basée sur l'intensité des précipitations et une fréquence de 30 minutes. Certains systèmes de pluviométrie ont été efficaces dans certains endroits, mais ils n'étaient pas adéquats pour être généralisés aux États-Unis. L'érosion a été associée à plus de 40 indices climatiques ou météorologiques (hauteur des précipitations, intensités

spécifiques, conditions antérieures de pluie et d'humidité, etc.) sur des parcelles standardisées nues et cultivées en direction de la pente par [Wischmeier et al. \(1958\)](#). L'association la plus importante a été constatée entre le niveau d'énergie pluviométrique (E) et son intensité maximale pendant une période de 30 minutes (I30). Le coefficient de corrélation était d'environ 90% et l'ajout d'autres variables accroissait considérablement l'exactitude. De plus, cette nouvelle variable (EI30) était distincte des variables de sol, de topographie, de culture et de préservation. Les mesures EI30 mettaient en évidence l'effet potentiel combiné des gouttes de pluie éclaboussures et de l'inondation des eaux de pluie sur la dégradation des terres.

Parmi les exemples mentionnés, on peut citer les travaux de [Meghraoui en 2019](#) sur l'érosion dans les Monts de Sabaa Chioukh (Nord-Ouest Algérien) et [Kazi Tani en 2019](#) sur l'évaluation des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant du barrage Mefrouche (Nord-Ouest Algérien). Cet indicateur peut être exprimé par la formule $R=0.03P^{1.288}$, où R est l'intensité des précipitations annuelles (mm). Les indices R et la répartition spécifique des précipitations annuelles sont présentés dans le tableau V-4.

Tableau V-4 Indice R d'érosivité des précipitations pour les stations Chouly, Meurbah, Lala Setti, Tlemcen, Mefrouche, Sidi Gourari, Sebdou et Beni Bahdel (1970-2021).

Station	Precipitation (mm)	Période	Longitude	Latitude	Élévation (m)	Érosivité des pluies (R)
Chouly	451	1970-2021	01°8'5"W	34°51'52"N	722	78,6
Tlemcen	589	1970-2021	01°19'29"W	34°52'26"N	810	110,9
Lalla Setti	603	1970-2021	01°19'29"W	34°51'58"N	1 007	114,3
Mefrouche	659	1970-2021	01°17'31"W	34°51'19"N	1110	128,2
Meurbah	422	1970-2021	01°10'19"W	34°44'46"N	875	72,2
Sidi Gourari	401	1970-2021	01°6'11"W	34°47'27"N	745	67,6
Sebdou	370	1970-2021	01°19'31"W	34°38'44"N	875	60,9
Beni Bahdel	456	1970-2021	01°29'48"W	34°42'33"N	660	79,8

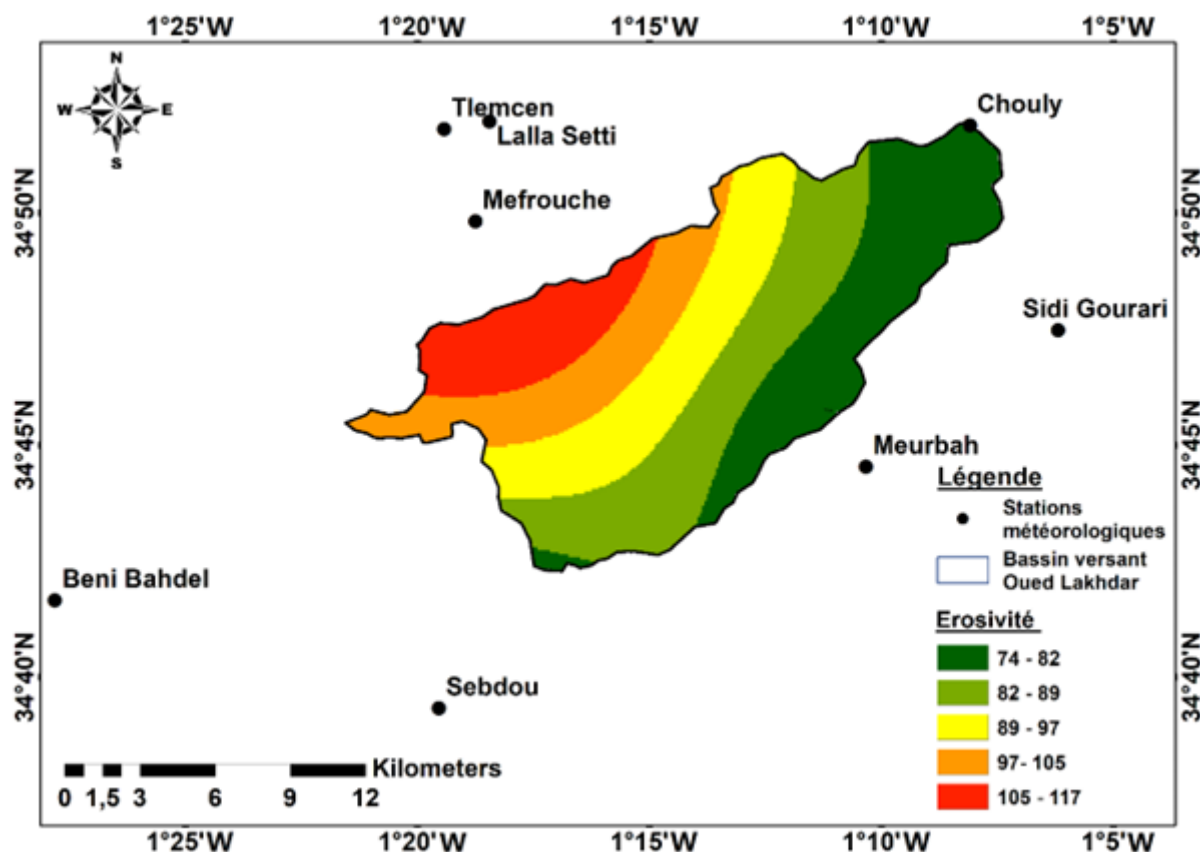


Figure V-6 Carte d'érosivité des pluies en ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Dans la figure V-6, on peut observer une diminution de l'érosivité des pluies dans la région d'étude d'Oued Lakhdar lorsque l'on s'approche de l'exutoire. Les précipitations sont d'intensité et d'agressivité variables, allant de 78 à l'extrémité du bassin versant jusqu'à 128 en amont du bassin versant.

V- 4.1.1.2. Facteur d'érodibilité du sol (K)

La notion d'érodibilité du sol K permet de mesurer la résistance des différents types de sols à l'érosion. Des sols sont plus vulnérables à l'érosion hydrique. Quelques caractéristiques des sols ont été utilisées comme fondement pour évaluer le facteur K (*El Hafid et Akdim., 2018*). Il est exprimé en tonnes/ha. MJ.mm. La nature de la roche joue un double rôle. Elle a un effet visible, d'une part, sur le fonctionnement des cours d'eau, d'autre part, sur l'érosion et le transport solide (*Tourki, 2019*). La composition lithologique du bassin versant d'Oued Lakhdar est extrêmement diversifiée. On y trouve des formations calcaires et dolomies, des formations calcaires marneuses, des alluvions terrassées, des alluvions actuelles, ainsi que des alternances gréseuses argileuses du crétacé et des marnes et des marnes gypseuses du triasique. Il existe cinq types de lithologie dans notre zone d'étude (tableau V-5). Deux valeurs distinctes de facteur (K) se distinguent dans la carte d'érodibilité (figure V-7) du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Tableau V-5 Formation du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Sol	Superficie (ha)
Calcaires et dolomies	4273,1
Calcaires marneux	3681,2
Alluvions terrassées	2796,1
Alluvions actuelles	3270,4
Alternances gréseuses argileuses du crétacé et des marnes et des marnes gypseuses du triasique	2978,8

Les données vectorielles sont obtenues on s'appuie sur la carte mondiale des terres de la FAO-UNESCO (Carte numérique des sols du monde DSMW). La carte numérisée des sols de la planète, à l'échelle 1 : 5 000 000, est représentée dans la projection géographique (latitude-longitude) avec un modèle qui inclut des caractéristiques liées à l'eau (littoraux, lacs, glaciers et rivières), (tableau V- 6).

Tableau V-6 Les caractéristiques des sols dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Symbole de l'unité de sol	Sable %	Limon %	Argile %	Carbone organique %
LC	64,3	12,2	23,5	0,63
BK	81,6	6,8	11,7	0,44

On a déterminé les valeurs de K (tableau V-7) selon la formule de Williams (équation V-2,3,4,5 et V-6) :

$$K = F_{\text{sable grossier}} \cdot F_{\text{argile-limon}} \cdot F_{\text{carbone organique}} \cdot F_{\text{sable élevé}} \quad (\text{V-2})$$

$$F_{\text{sable grossier}} = (0,2 + 0,3e^{(-0,0256m_{\text{sable}}(1-\frac{m_{\text{limon}}}{100}))}) \quad (\text{V-3})$$

$$F_{\text{argile-limon}} = (\frac{m_{\text{limon}}}{m_{\text{argile}}-m_{\text{limon}}})^{0,3} \quad (\text{V-4})$$

$$F_{\text{carbone organique}} = (1 - \frac{0,25 \text{ carbone organique}}{\text{carbone organique} + e^{(3,72-2,95\text{carbone organique})}}) \quad (\text{V-5})$$

$$F_{\text{sable élevé}} = (1 - \frac{0,70(1-\frac{m_{\text{sable}}}{100})}{(1-\frac{m_{\text{sable}}}{100}) + e^{(-5,51+22,9(1+\frac{m_{\text{sable}}}{100}))}}) \quad (\text{V-6})$$

Avec :

m_{sable} ; m_{limon} ; m_{argile} : les masses de sables, argiles et limons; F (sable grossier) : est un facteur qui abaisse l'indicateur K dans les sols à forte teneur en sable grossier et plus élevé pour les sols à faible teneur en sable ; F (argile-limon) donne de faibles facteurs d'érodabilité du sol pour les sols avec des rapports argile/limon élevés ; F (carbone organique) : réduit la valeur K dans les sols à forte teneur en carbone organique ; F (sable élevé) diminue la valeur K pour les sols à teneur en sable extrêmement élevée.

Tableau V-7 Les valeurs de facteurs d'érodibilité (K) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Symbole de l'unité de sol	F (sable grossier)	F (argile-limon)	F (carbone organique)	F (sable)	K (USLE)
LC	0,2000002	0,7246153	0,9777019	0,9830338	0,1393
BK	0,2	0,7406298	0,990605	0,718479	0,1054

Les valeurs de facteur K (figure V-7) varient entre 0,1054 et 0,1393.

- Les calcaires et les dolomies sont les sols les plus répandus dans notre zone d'étude, avec une superficie de 4273,1 hectares, soit 25 % du bassin, et un coefficient d'érosion de 0,1054.
- Les calcaires marneux sont la deuxième pierre principale du bassin versant après les calcaires et les dolomies, représentant 21 % de la superficie totale et ayant un coefficient K de 0,1054.
- Les alluvions terrassées sont vulnérables à l'érosion et représentent 16 % de la superficie totale du bassin versant ;
- Les alluvions actuelles représentent 19 % de la superficie totale du bassin versant ;
- La formation la plus érodable dans notre zone d'étude est la combinaison de gréseuses argileuses du crétacé et de marnes gypseuses du triasique. Elle s'étend sur une surface de 2978,8 hectares, soit 17 % de la surface de la région d'étude, avec un coefficient d'érodabilité K de 0,1393.

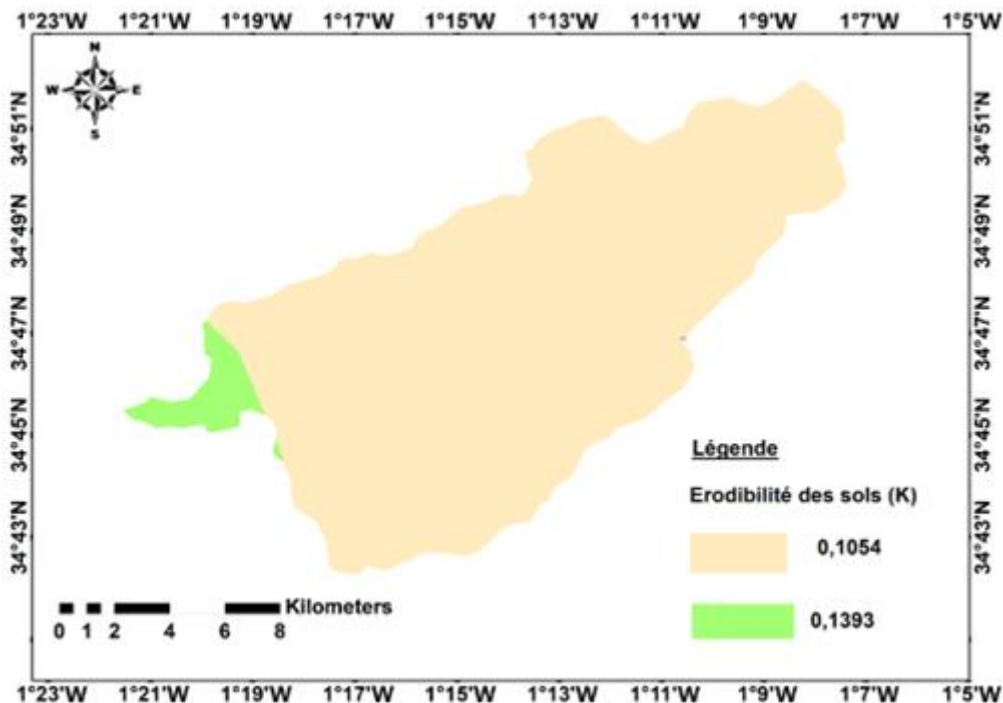


Figure V-7 Carte d'érodibilité (K) de bassin versant d'Oued Lakhdar.

V- 4.1.1.3. Facteur topographique (LS)

Les facteurs de longueur et d'inclinaison des pentes ont un impact significatif sur l'érosion du sol. La longueur du pilier influence la vitesse de ruissellement et le mouvement des particules. Avec l'augmentation de la hauteur du pilier, son taux d'érosion augmente aussi.

L'utilisation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 30 m permet de déterminer la longueur des pentes (L) et la pente (S) du facteur topographique (LS). Pour adapter la formule empirique de départ aux conditions montagneuses complexes, on fait appel au DEM pour déterminer LS. En particulier, son application est adaptée pour l'utilisation du SIG et du MNT en considérant une zone d'accumulation et une inclinaison. Ce paramètre illustre l'effet combiné de la longueur et de la pente du sommet.

Une étude des résultats des zones érodées a été réalisée par [Wischmeier et Smith \(1978\)](#) et les relations suivantes (équation V-7 et V-8) ont été établies avec le facteur L.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (\text{V-7})$$

L est le coefficient de longueur de la pente.

λ : Distance à la pente (m).

$$\lambda = \left(\frac{\text{accumulation de flux} \times \text{longueur en pixels}}{3,1416} \right)^{0,5} \quad (\text{Bolton et al, 1995})$$

$$S = 0,065 + 0,045 s + 0,0065 s^2 \quad (\text{V-8})$$

Le facteur d'inclinaison de la pente est S, tandis que l'inclinaison de la pente est s. m est un coefficient lié au rapport entre la dégradation des sols, avec une valeur de 0,5 pour les pentes supérieures à 5 %, 0,4 pour les pentes de 3,5 à 4,5 %, 0,3 pour les pentes de 1 à 3 % et 0,2 pour les pentes inférieures à 1 %.

Le processus d'érosion hydrique est fortement influencé par la pente. Les taux des pentes les plus élevés allant de 23 à 41% qui représentent 2% de la surface totale de bassin versant et se trouvent dans le sud du bassin d'Oued Lakhdar, en particulier sur les sommets aux pentes extrêmement abruptes (figure V-8). La classe des pentes de 13 à 18% qui représente les pourcentages les plus élevés (33%) dans le bassin versant. La zone humide du bassin, située à côté de l'Oued Chouly, est attribuée aux valeurs faibles entre 0 et 5 %. Le bilan V-8 illustre les diverses catégories de pentes présentes dans

la région d'étude de l'Oued Lakhdar. La figure V-9 représente les différentes valeurs de LS (longueur et inclinaison de la pente).

Tableau V-8 Classes de pentes pour le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Classe de pente %	Superficie (ha)	% de la superficie
23-41	940	5
18-23	1210	7
13-18	4610	27
9-13	2400	14
5-9	2570	15
0-5	1870	11

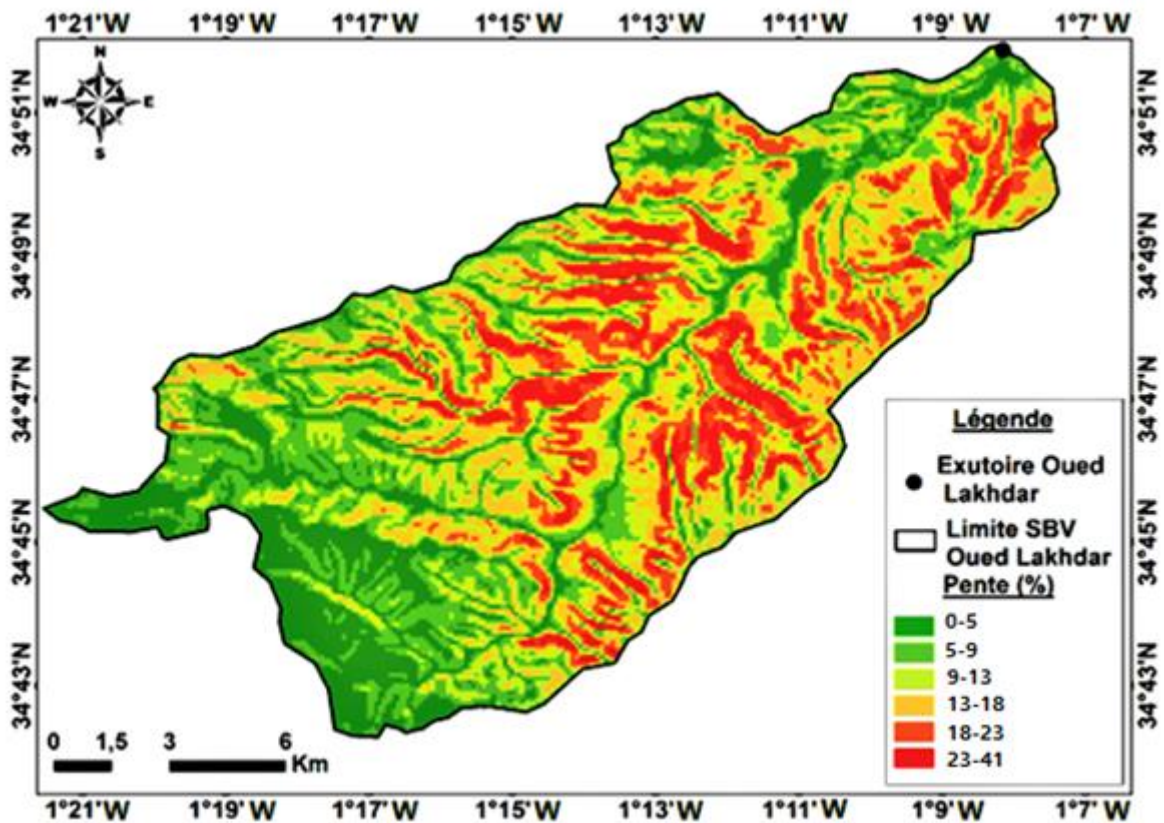


Figure V-8 Pente du bassin versant d'Oued Lakhdar.

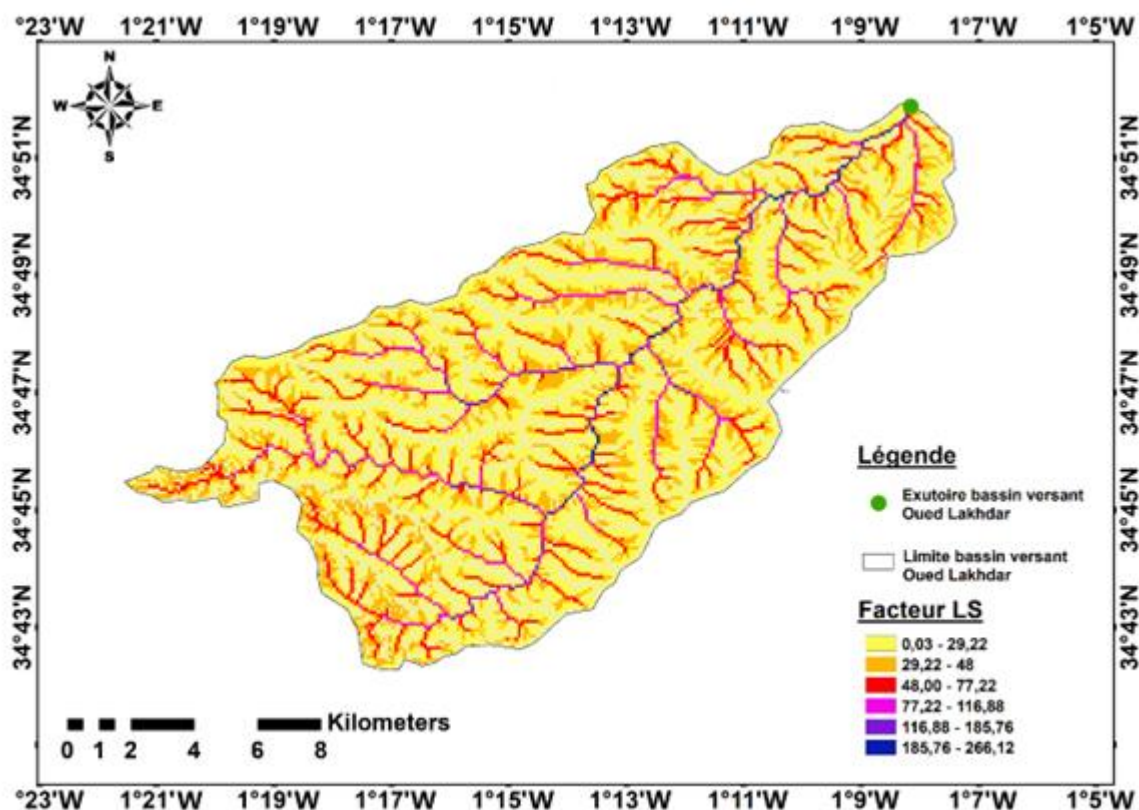


Figure V-9 Les variations de LS dans la région de l'Oued Lakhdar.

V- 4.1.1.4. Facteur d'exploitation du couvert (C)

Le revêtement végétal qui protège les sols dissipe l'énergie des gouttes de pluie. La densité (recouvrement du sol) au cours du temps et de l'espace ; la hauteur des arbres ; l'apport de matière organique sont les principaux facteurs qui influencent l'érosion du sol.

Les instruments de télédétection ont été utilisés pour l'analyse du sol (image satellite de haute résolution spatiale et spectrale, extraite du site USGS. Le satellite LANDSAT ETM a fourni l'imagerie satellite, une scène qui comprend la zone de test a été capturée en novembre 2021.

Les données cartographiques et thématiques ont été extraites et actualisées grâce à l'image qui a été incluse dans un SIG. En prévision des traitements, des ajustements géométriques et radiométriques ont été réalisés. Une fois que les informations ont été recueillies et traitées, il faut effectuer le contrôle pour écarter les incertitudes quant aux détails non visibles observés sur les photos et les plans topographiques. Ensuite, l'imagerie est visualisée sur Google Earth Professional, puis une visite sur place est réalisée pour décrire les différentes unités cartographiques et identifier les différentes couches du paysage végétal (forêt, matorral, parcelle cultivée, sol nu, etc.) afin de confirmer la catégorisation de l'image photo. Chaque genre de végétation a été évalué à C. [Wischmeier \(1978\)](#) propose d'évaluer

l'indice C pour la flore naturelle en prenant en compte différents éléments tels que les altitudes et les densités des végétaux capables de capter l'énergie des précipitations.

D'après les recherches [d'Angima et al \(2003\)](#), la valeur de C peut fluctuer de près de zéro pour les sols bien protégés à 1 pour les surfaces striées très exposées à l'érosion en rigoles. Il est possible de le mesurer en se référant aux valeurs observées pour un type de végétation ou de culture donné (Tableau V-9). [Wischmeier et Smith \(1978\)](#) présentent différents effets du type de couverture végétale et du type de culture à travers des tableaux.

Tableau V-9 La valeur de (C) pour différentes cultures et pratiques.

Couverture végétale et utilisation de la terre	Valeur de (C)
Forêt dense	0,003 - 0,01
Forêt éclaircie avec sous strate herbacé dense	0,003 - 0,01
Forêt éclaircie avec sous strate herbacée dégradée	0,01 - 0,1
Buisson dense	0,003 - 0,03
Buisson clair avec substrat herbacé dense	0,003 - 0,03
Buisson clair avec substrat herbacé dégradé (ouvert)	0,03 - 0,10
Étendue désertique	0,003 - 0,04
Pâturage naturel complet	0,03 - 0,01
Pâturage naturel (nourriture pour animaux)	0,04 - 0,20
Pâturage cultivé (géré)	0,003 - 0,04
Terrains dépourvus de végétation	0,9 - 1,0
Cultures annuelles de cycle court (1-6 mois)	0,3 - 0,8
Cultures annuelles de cycle long (6 mois)	0,4 - 0,9
Cultures permanentes associées (denses)	0,01 - 0,3
Cultures permanentes non denses	0,1 - 0,45
Jardins de subsistance	0,3 - 0,9
Zones urbaines	0,003 - 0,01
Lagons et barrages	0

Source : [Wischmeier y Smith \(1978\)](#).

On peut définir le facteur C comme le rapport entre la dégradation des terres nus dans des conditions particulières et la dégradation des terres correspondantes aux sols utilisés dans un système d'exploitation. Les mesures sur le terrain de la couverture du sol sont utilisées pour calculer ce facteur ([Wischmeier et Smith, 1978](#)). Le facteur C peut être évalué en utilisant les valeurs de NDVI pour évaluer la perte de sol à l'aide de USLE (Wang et al, 2002). Le modèle de régression est utilisé par ces techniques afin de mener une étude de corrélation entre les valeurs du facteur C obtenues sur le site ou extraites des tableaux guide et le NDVI. La formule (équation V-9) est :

$$C = 0,06 - 1,4 NDVI \quad \text{(V-9)}$$

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'indice le plus connu et le plus utilisé car il est simple, normalisé et ne requiert pas d'informations sur les paramètres du sol ; il est efficace comme un indicateur du comportement de la végétation par sa relation avec l'activité chlorophyllienne (Bouzekri, 2015). Le facteur de (NDVI), dans le bassin versant d'Oued Lakhdar varie entre -0,5 et +0,02, ces valeurs faibles montrent la dégradation de couvert forestier (Figure V-10) et les valeurs de facteur C varient entre 0,032 pour les forêts et 0,76 pour les sols nus (tableau V-10).

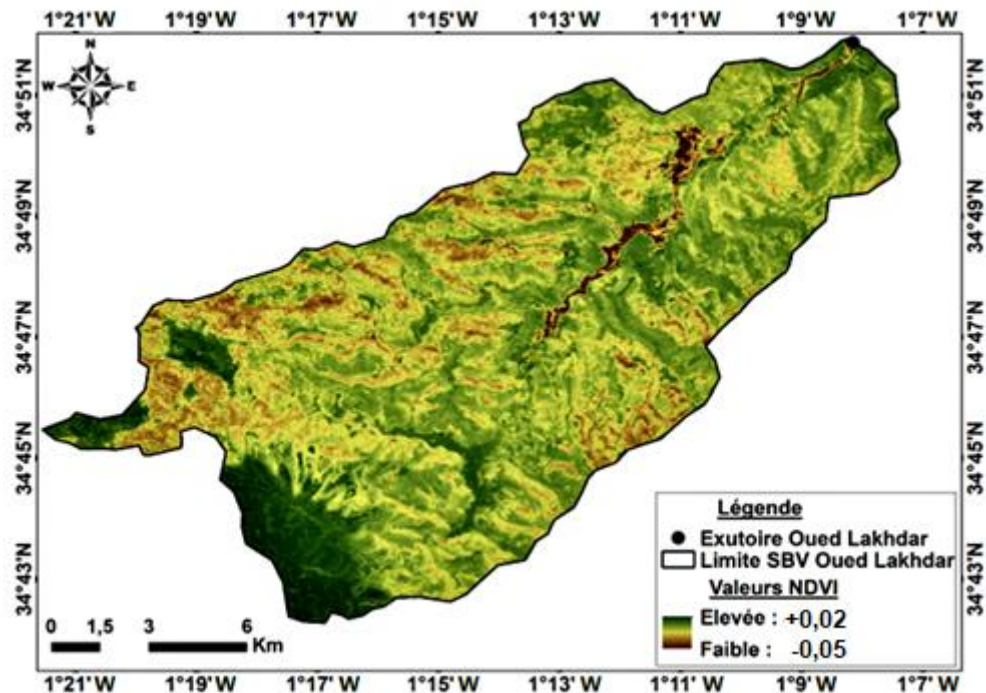


Figure V-10 Indice de végétation (NDVI) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

La majorité de la surface du bassin versant d'Oued Lakhdar est dédiée à l'agriculture (1 961ha), l'arboriculture occupant environ 140 ha et présentant une gamme d'espèces, notamment le cerisier, l'olivier, le figuier, l'amandier, l'abricot, le pommier, le pêcher, le poirier et les rosacées rustiques qui ont évolué pour prospérer dans des conditions difficiles. Dans la vallée de l'Oued Lakhdar, le cerisier est l'élément caractéristique de l'arbre et constitue une spéculation ancienne dans laquelle les habitants privilégient leurs intérêts.

Deux sous-zones peuvent être créées au sein de ce bassin versant agricole :

- La vallée de l'oued Lakhdar, s'étendant sur 600ha ;
- Dans les 1 361 ha de contreforts et de plateaux du Piémont de Miez, Yebdar, Hella et Sidi Chaïb, les sols ont une valeur agro pédologique moyenne pour les terres sèches.

L'utilisation du sol dans la zone de drainage de l'Oued Lakhdar indique que la superficie occupée par un couvert forestier dégradé. Ce type de couvert végétal prolifère sur les terrains squelettiques parfois à forte pente entre 23 et 41 %. Les 4 779 ha de terres forestières de bassin versant sont largement

couverts de végétation arborescente et arbustive sur le versant nord des chaînes de montagnes qui entourent la haute vallée de l'Oued Lakhdar.

Des crêtes somptueuses et des formations dégradées ont été transformées en maquis, de faibles marges au milieu et des maquis de haute altitude. Aux stades arbre, arbuste et brousse, un patrimoine sylvicole est constitué par diverses espèces forestières au Djebel Dar Chikh (1 606m), Djebel Tazkninet (1 510 m), ou Djebel Mekmene Zouil (1 388 m). Des formations majoritairement basses, les palmiers nains et le Diss dominent les 1818 ha de parcours. Ces terres deviennent des pâturages à tout moment de l'année, entraînant un surpâturage excessif avec toutes ses conséquences sur le sol et l'érosion (Meghraoui, 2019).

Dans la région d'étude, 28 % de la superficie du bassin intégré à la chaîne montagneuse est occupée par des forêts et des pâturages dégradés, de sorte que la composition topographique des reliefs présente une orientation forestière-pastorale dans la zone. La distribution du couvert végétal est essentielle pour préserver les sols contre la dégradation des terres.

Le couvert végétal naturel est constitué majoritairement de maquis dégradés et distingue :

- Exposition rocheuse ;
- Couvert forestier dégradé à base d'Ampelodesma mauritanica et de Quercus ilex ;
- Pâturage à base d'Ampelodesma mauritanica et de Doum ;
- Sol nu et graminées (cultures extensives).

Cinq types d'occupation des sols sont présents dans la zone d'étude (Figure V-11).

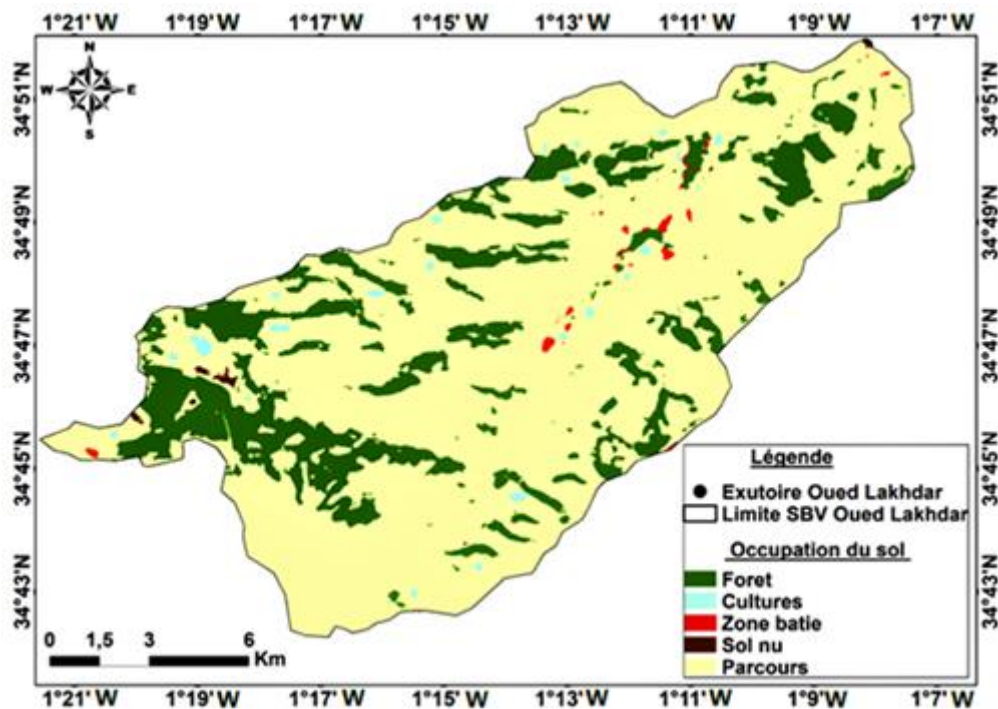


Figure V-11 Carte d'occupation de sol dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Les forêts présentent un facteur C de 0,032 (tableau V-10) pour une superficie totale de 4779 ha et un NDVI de (+0,02). Les zones de parcours ont un facteur C de 0,26 pour un pourcentage de 40 % et un NDVI de (-0,145). Les cultures occupent 1961 ha avec un facteur C de 0,28 et un NDVI de (-0,158).

Tableau V-10 Différents types d'occupation de sol du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Type d'occupation de sol	Superficie (ha)	% de la superficie	Facteur d'exploitation de couvert (C)
Foret	4 779	28	0,032
Culture	1961	11	0,28
Sol nu	1 532	9	0,76
Parcours	6 918	40	0,26
Zone bâti	1 810	10	0,003

Selon la carte d'occupation du sol (figure V-11), notre zone d'étude est principalement occupée par les parcours (Tableau V-10), qui représentent 40% de la superficie totale, avec un facteur C d'environ 0,26. Il est important de noter que le couvert végétal protège les sols et joue un rôle dans l'amortissement des précipitations. Les pertes des terres diminuent lorsque le couvert végétal augmente (Soutter et al, 2007). La superficie de la classe protectrice « forêts » dans notre zone est limitée à 4 779 hectares, ce qui représente 28 %. La superficie des sols nus et des badlands, considérés comme le stade ultime de l'érosion, s'élève à 1 532 ha, ce qui représente 9 %, avec un facteur C très élevé égal à 0,76. Les différentes valeurs des facteurs C sont illustrées dans la figure V-12.

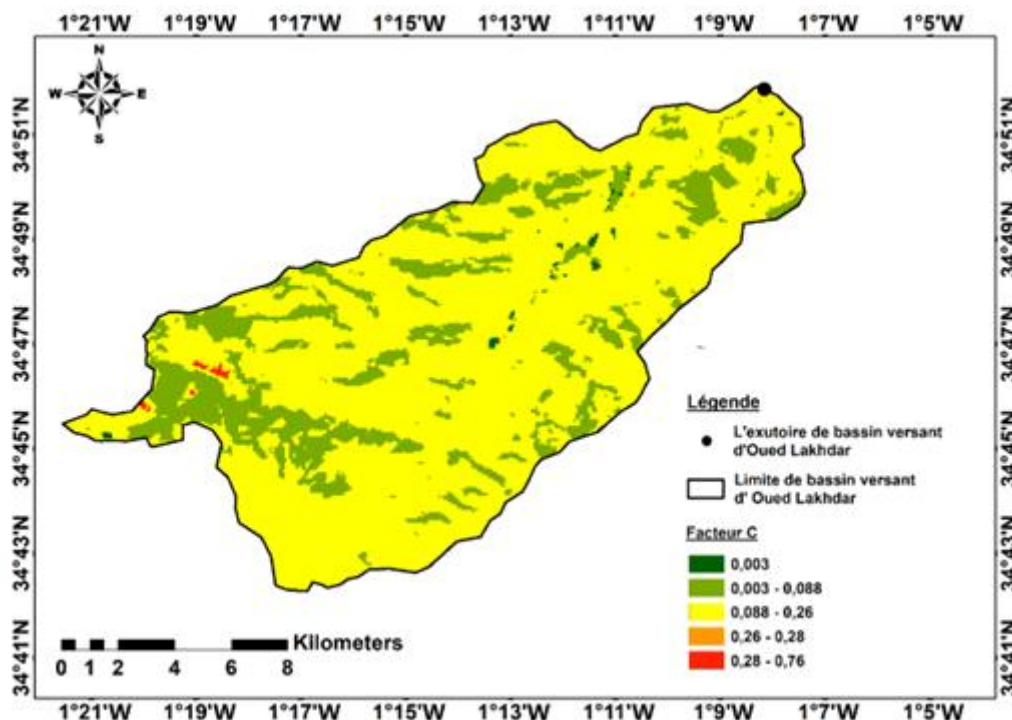


Figure V-12 Différentes valeurs de C dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Les performances du facteur C obtenues dans notre région d'étude sont comparées aux résultats obtenus par *Kazi Tani (2019)* dans le bassin versant Mefrouche et *Meghraoui (2019)* dans le bassin versant de Sabaa Chioukh. Ces deux bassins versants se trouvent au nord-ouest d'Algérie, à proximité de notre bassin versant. Les valeurs pour les forêts (C = 0,08) et les parcours (C = 0,26) sont pratiquement identiques. Les mêmes valeurs sont obtenues en comparant les valeurs de *Wischmeier et Smith (1978)* qui établissent des valeurs préétablies pour les forêts, les matorrals et les pâturages aux États-Unis.

En comparant avec les recherches de *Maamar Kouadri (2019)* sur l'érosion hydrique des sols dans le tell Oran au nord-ouest d'Algérie, on observe des valeurs de (C) supérieures à notre valeur, comme par exemple pour les forêts (C = 0,33) et pour les sols nus (C=1).

Dans ses recherches sur l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Bounamoussa (Nord-Est algérien), *Bouhadeb (2019)* a obtenu des valeurs de C acceptables (Foret Dense (c =0,12) et Foret Claire (c =0,15) respectivement).

V- 4.1.1.5. Facteur de pratique antiérosive (P)

Les méthodes antiérosives désignent les initiatives visant à préserver le sol, englobant toutes les techniques agricoles utilisées pour réduire l'écoulement des eaux et la dégradation des sols.

Généralement, le facteur P fluctue entre 0 et 1, en fonction de la méthode utilisée et du type de pente.

Le nombre 0 signifie qu'un terrain est résistant à la dégradation d'origine humaine, tandis que le nombre 1 signifie qu'il n'y a pas de politique pour lutter contre la dégradation des terres.

Pour lutter contre l'érosion dans la région de l'Oued Lakhdar, on utilise différentes techniques telles que le labour en courbes de hauteur, les cultures en hauteur alternée ou en terrasses, les reboisements en banquettes et le buttage et billonnage pour les cultures maraichères verticaux.

Nous avons identifié et exposé les facteurs de préservation de notre zone d'étude dans le tableau V-11, Dans le bassin versant d'Oued Lakhdar, le facteur RUSLE (P) fluctue entre 0,05 et 0,2 en fonction du type de culture et de l'inclinaison du sol, en moyenne, ce facteur égale 0,12.

Tableau V-11 Différents pratiques culturales du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Pratique culturale	Superficie (ha)	% superficie	Facteur (P)
Foret	4 779	28	0,10
Culture maraichères	1821	10	0,06
Cultures arboriculture	140	0,8	0,05
Terres de parcours (les palmiers nains et le Diss)	1818	10	0,20
Terres de parcours (Doum et Ampelodesma)	5100	30	0,20

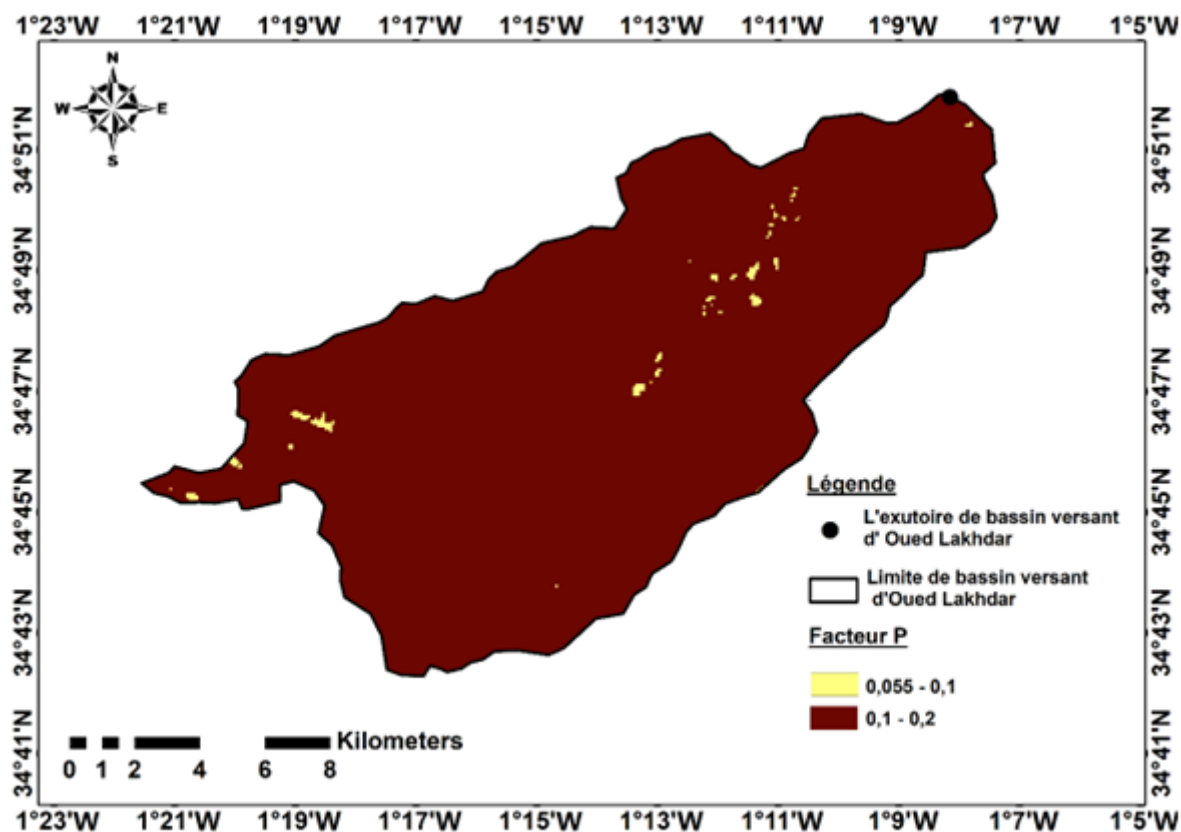


Figure V-13 Différentes valeurs de facteur P dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Selon la représentation graphique V-13 et le tableau V-8, les cultures maraichères et les forêts constituent respectivement 10 et 28 % de la population du bassin, en comparaison avec 0,8 % pour l'arboriculture.

V.4.2. Quantification de l'érosion par (RUSLE)

V.4.2. Analyse des pertes des terres

Les cinq éléments de USLE ont été intégrés dans un SIG, ce qui a simplifié la présentation des résultats pour chaque composant. La superposition cartographique a été réalisée en utilisant le SIG pour établir la carte des pertes en sol dans la région de l'Oued Lakhdar (E exprimée en tonnes par hectare par an par unité spatiale (pixel du MNT).

L'approche RUSLE utilise la superposition de différentes cartes (Figure V-14) afin d'évaluer la dégradation des terres dans la zone d'étude.

Les éléments du modèle RUSLE, comme l'agressivité du climat R (ou l'érosivité des précipitations), l'érodibilité des sols K, ainsi que l'influence combinée du degré et de la longueur de la pente LS, de la couverture végétale C et des mesures antiérosives P, jouent un rôle dans le taux d'érosion. Cette implication nous permet de mesurer la répartition du risque d'érosion en se basant sur ces facteurs (Markhi et al, 2015).

Suite à la fusion et au traitement en arc GIS de ces cinq facteurs mentionnés précédemment, le Mapp a facilité la création d'une carte d'érosion potentielle sur le bassin d'Oued Lakhdar (Figure V-14).

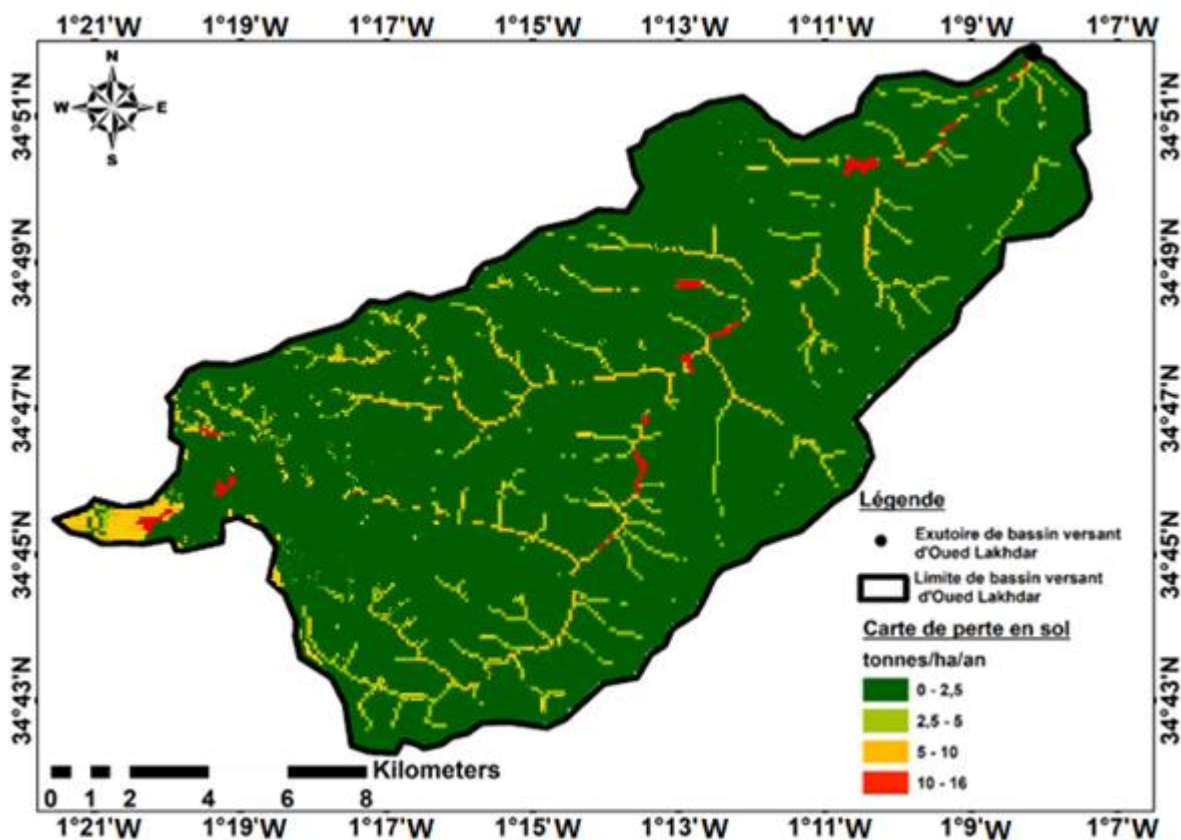


Figure V-14 Carte de dégradation des terres dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

La dégradation des terres en (t/ha/an), (tableau V-12), sont groupées en quatre catégories :

- La première catégorie, située entre 0 et 2,5 tonnes par hectare par an : Elle englobe les régions présentant une faible érosion. Elle constitue 73 % de la surface totale de la région d'étude, la moitié de cette zone est envahie par des forêts de maquis et du reboisement, se distribuant dans les zones sud-ouest du bassin ;
- La seconde catégorie, qui se situe entre 2,5 et 5 tonnes par hectare par an, occupe 7 % de la superficie de la région d'étude, sa majorité se situe à proximité de l'Oued Chouly ;
- La troisième catégorie (classe d'érosion intense) se situe entre 5 et 10 tonnes par hectare par an, constituant 12 % de zone d'étude. Elle est localisée en amont en sud-ouest du bassin versant et à côté des berges d'Oued Lakhdar ;
- La quatrième catégorie (Erosion extrêmement forte) comprend les territoires où l'érosion se situe entre 10 et 16 tonnes par hectare par an. Elle couvre 7 % de la région d'étude, avec une petite partie dans le sud-ouest et à proximité de l'oued Lakhdar.

Tableau V-12 Perte de sol moyenne annuelle du bassin versant d'Oued Lakhdar.

Superficie (ha)	% de la superficie	Facteur (E) (t/ha/an)	Sensibilité à l'érosion
12416,9	73	0-2,5	Faible
1242	7	2,5-5	Moyenne
2134	12	5-10	Haut
1208,4	7	10-16	Très haut

En analysant la fragilité des sols à la dégradation des terres causer par les écoulements des eaux dans la région d'étude, on a pu distinguer quatre catégories de vulnérabilité multifactorielle : une sensibilité faible, moyenne, haute et extrêmement haute. Plus de 73% de la surface totale du bassin est couverte par des zones à faible sensibilité, tandis que plus de 7 % sont caractérisées par une sensibilité moyenne. De plus, 19 % de ces zones ont une sensibilité élevée ou extrêmement haute.

Dans la région d'étude d'Oued Lakhdar, l'étude menée par RUSLE sur la dégradation des terres en nappe a révélé une valeur de $8,43 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, ce qui équivaut à $143\,310 \text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$, dépassant ainsi le seuil de dégradation des terres linéaire estimé à $0,74 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, en se basant sur les mesures des concentrations effectuées par l'ANRH à la station hydrométrique.

Dans la partie aval, l'érosion hydrique est essentiellement linéaire, avec des badlands particulièrement dans les monts des Traras du sous bassin versant de Sidi Abedelli. Ce dernier alimente le plus grand barrage de la Wilaya (El Izdihar), cependant, l'érosion intense qui les affecte entraîne chaque année, suite à des transports solides considérables, un volume considérable de sédiments. L'érosion a aussi provoqué une diminution significative des terres cultivables.

L'érosivité des pluies n'est pas la principale cause du danger d'érosion dans la zone d'étude, mais plutôt la vulnérabilité des sols (pentes robustes, bases souples et revêtement végétal détérioré) ainsi que les comportements humains inadaptés. L'érosion est causée par des méthodes agricoles peu efficaces, Dans les régions montagneuses comme les Traras Chouly, Mefrouche et Sebaâ Chioukh, on constate fréquemment une extension de la culture céréalière sur des sols en pente, l'expansion de la culture sous serre, la mécanisation, entre autres.

Plusieurs projets d'aménagement antiérosif (tels que les reboisements, les cultures fruitières, les banquettes, la correction torrentielle, la fixation des berges, etc) ont été mis en place dans le bassin versant d'Oued Lakhdar, notamment dans les zones considérées prioritaires pour intervenir (comme le barrage El Izdihar de Sidi Abdelli et les agglomérations d'Oued Chouly). Il arrive que les actions antiérosives instaurées ne parviennent pas à empêcher l'érosion, mais plutôt à l'accélérer, Il est actuellement conseillé d'adopter des méthodes traditionnelles pour préserver l'eau et le sol, comme la construction de terrasses, la culture basée sur les courbes des niveaux, la mise en place de haies vives ou mortes, ainsi que l'élaboration de cordons biologiques ou de pierres sèches pour limiter le ruissellement. La gestion durable des terres par les agriculteurs permettra une maîtrise efficace des transports solides et liquides, ce qui permettra également d'économiser du temps et de l'argent.

Le modèle RUSLE révèle l'évolution présente des matériaux érodés à chaque endroit de la région d'étude, en fondant principalement sur la dégradation des terres en nappe. Il est possible d'affirmer que

le modèle néglige les mécanismes de transport des matériaux qui dépendent du flux superficiel et de sa capacité.

Dans la région d'étude d'Oued Lakhdar, il n'y a pas eu de recherches scientifiques récentes qui utilisent des techniques spatiales pour identifier les régions exposées à la dégradation des terres.

C'est pourquoi nous avons tenté de comparer nos résultats avec des travaux récents dans des zones d'études situées à proximité de notre bassin versant et qui présentent les mêmes conditions hydrogéologiques et climatiques, ainsi que les mêmes activités humaines agricoles, comme par exemple :

Selon l'étude de [Mankouri \(2009\)](#), deux sous-bassins (Gourari et Madjoudj) du bassin versant d'Isser ont été examinés. Grâce aux résultats obtenus pendant la période (1991-2006), il a été possible d'évaluer l'effet de certains systèmes de gestion très répandus dans la région d'étude sur le ruissellement. Selon des études réalisées sur des parcelles de type Wischmeier, il est observé une érosion en nappe modérée. Les pertes les plus importantes en sols sont observées à l'automne et sont plus élevées sur un sol nu que sur un sol couvert.

Dans son travail de [2010, Zobiri](#) a examiné les mesures de préservation des sols à l'amont du barrage El Izdihar de Sidi Abdelli. L'analyse des aménagements antiérosifs se concentre sur deux catégories d'aménagements : les aménagements mécaniques (seuils en gabion, en pierres sèches, seuils en terre) et les aménagements biologiques (reboisement, plantation fruitière et viticole). En analysant la situation des aménagements, il est évident que les techniques et les méthodes de préservation du sol sont insuffisantes (une grande partie des seuils ne remplissent pas leur fonction (plus de 30%), la plupart des espèces végétales utilisées pour fixer les berges ne sont pas adaptées, l'absence de sensibilisation des populations riveraines, et le manque de suivi et d'entretien).

[Beneddine \(2012\)](#) a tenté d'analyser les dégradations particulières de la zone de la Tafna en se basant sur des mesures des débits liquides et de la concentration. L'application de l'équation « USLE » de Wischmeier a permis de modéliser ces pertes de terre. Cette application utilise le modèle hydrologique SWAT pour deux motifs distincts. Ce modèle a été validé pour la partie hydrologique de ce bassin. De plus, il intègre l'équation « USLE » afin de simuler la dégradation des terres et le déplacement des sédiments dans les bassins versants.

[Zettam \(2018\)](#) se penche sur les processus de transfert des nitrates et des sédiments au sein du bassin versant Tafna (7200 km²), ainsi que des fleuves les plus importants d'Afrique du Nord, en combinant les observations in situ avec le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Entre 2003 et 2011, la Tafna a effectué un transfert annuel moyenne de 2942 tonnes par an vers la mer, SWAT a également révélé que les cinq barrages de la Tafna conservent une importante quantité de sédiments, dépassant les 27 000 tonnes par an (représentant 90% du transport des sédiments effectué par la Tafna).

La cartographie pédopaysagère synthétisée par Sabaa Chioukh par [Meghraoui \(2019\)](#) s'est révélée bénéfique pour déterminer le facteur unité sol et son érodibilité, qui varie entre 0,23 et 0,46. Les caractéristiques du sol, qui ont un impact significatif sur la dégradation des terres. L'intégration de

l'équation de RUSLE dans un SIG a permis d'analyser la dégradation des terres. L'étude a divisé les pertes annuelles en quatre catégories, allant de 0 à 200 tonnes par hectare par an. La catégorie de 150 à 200 tonnes par hectare par an est la plus significative, constituant 56,58% du territoire d'étude, L'observation de l'érosion révèle une fluctuation annuelle de l'érosion, associée aux changements climatiques et à la couverture du sol, Par conséquent, la réactivité face à l'érosion varie d'une saison à une autre ; les pertes en terre varient de manière spatiale et temporelle.

Boughalem et al (2020) ont fourni des informations cruciales pour la cartographie de fragilité des terres face à la dégradation des terres par le ruissellement dans zone d'Isser. L'approche implique l'examen de quatre éléments qui régulent la dégradation des terres : la lithologie, la topographie, les précipitations et le revêtement végétal. La combinaison additivement des cartes associées à ces indices dans un (SIG) à aider à obtenir une carte de sensibilité liée à la dégradation des terres. La carte réalisée, révèle trois principales zones de vulnérabilités : intense, principalement située au centre et au nord du bassin ; moyenne, majoritairement dans le nord et une partie du sud du bassin ; et faible ou inexistant dans l'ensemble du bassin versant dans les domaines qui contiennent une biomasse abondante.

Millares et al (2020) ont examiné les variations saisonnières des particules en suspension et son lien avec l'érosion et le transport. Les informations provenant de la zone d'étude de l'Isser (nord-ouest de l'Algérie) ont été analysées par les hauteurs, ont prenant en considération les méthodes utilisées au niveau de l'événement. Les données révèlent des disparités notables dans la production et le déplacement des sédiments entre les périodes de sécheresse et d'humidité. L'étude a estimé un taux de 8 tonnes par an, avec des valeurs respectives de 4,3 et 13 tonnes par an pour les saisons humides et sèches. Les prévisions concernant le taux de distribution du sol ont mis en exergue des valeurs supérieures durant les périodes sèches et la prédominance des processus d'érosion dans les pentes. L'ajustement de MUSLE a révélé l'importance des précipitations au cours de la saison de sécheresse. Ces conclusions mettent en lumière le rôle crucial des saisons dans la dégradation des terres et de déplacement des particules solides, notamment pour les changements climatiques influençant les prévisions.

L'approche cartographique adoptée par *Zekri et Tounkob en 2021* a été mise au point dans la zone d'étude de la Tafna. L'étude a identifié cinq catégories de sensibilité face à la dégradation des terres. La région d'étude présente une sensibilité extrêmement basse englobent 7,32% de la superficie du bassin, tandis que les régions présentant une sensibilité moyenne et faible englobent plus d'un quart (51,8%) et 40,8%. L'érosion hydrique, principalement linéaire, affecte le plus la partie aval du bassin en raison de la prédominance des terrains accidentés et de la présence de substrats tendres. La zone amont, en raison de sa structure lithologique qui résiste à l'érosion, est plus stable.

V- 5. Etude de transport solide dans le bassin versant d'Oued Lakhdar

Le phénomène de sédimentation résulte de deux processus, la dégradation des terres et le déplacement des particules solides, qui se produisent à l'amont de la retenue et au niveau du bassin versant.

Ce travail se concentre sur l'étude des effets des transports solides et des crues. Le présent travail, qui repose sur les mesures des débits liquides et des concentrations enregistrées à l'exutoire de l'Oued Lakhdar, un affluent de la Tafna, se divise en deux parties : la première étudiera statistiquement à différentes échelles temporelles les débits liquides Q_L et les débits solides Q_S de la série de mesures disponible afin de trouver la modélisation la plus appropriée et d'évaluer le taux de dégradation spécifique dans le bassin d'étude.

V- 5.1. Matériels et méthodes de calculs

Un pluviographe est installé à la station d'Oued Lakhdar pour enregistrer sur bande papier les précipitations. Il permet d'évaluer la quantité de pluie et sa distribution dans le temps, ce qui entraîne son intensité. L'oued Lakhdar utilise les mêmes méthodes de mesure des débits liquides et des concentrations de matières en suspension que les autres oueds en Algérie (*Terfous et al, 2001 ; Benkhaled et Remini, 2003 ; Achite et Ouillon, 2007*). Deux méthodes sont utilisées pour mesurer les débits liquides : le dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur et la courbe de tarage à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique. Les échantillons prélevés manuellement sont conservés à une température ($t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$) et sont conformes au protocole de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Afin d'évaluer les teneurs des sédiments en suspension, la totalité des particules retenues est filtrée à l'aide d'une membrane en fibre de verre (Whatman GF/F) à porosité de $0,2 \text{ }\mu\text{m}$. Ensuite, on sèche les filtres à l'étuve pendant une heure à une température de $105 \text{ }^\circ\text{C}$. On calcule la concentration des matières en suspension de la façon suivante (équation V-10) :

$$C = \frac{P_2 - P_1}{V} \quad \text{(V-10)}$$

C : Concentration en (g/l),

P_1 : La masse du filtre en fibre de verre sec et vide en (g) avant la filtration,

P_2 : La masse du filtre en fibre de verre avec les sédiments en suspension en (g),

V : Le volume de l'échantillon filtré en (l),

Les échantillons sont ajustés en fonction du régime hydrologique. Ils sont réalisés un jour sur deux en période normale et pendant les crues, les prises sont effectuées à des intervalles d'une heure ou de 30 minutes en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. Le débit solide est calculé par l'équation (V-11) :

$$Q_s = C \cdot Q_L \quad \text{(V-11)}$$

Q_s : débit solide mesuré (kg, s^{-1})

Q_L : débit liquide ($\text{m}^3, \text{s}^{-1}$)

C : la concentration des matières en suspension (g, L^{-1})

Plusieurs méthodes sont utilisées pour qualifier et contrôler la relation entre le débit liquide et solide, on distingue : la méthode de corrélation - régression, le débit liquide et solide évolue suivant un modèle de puissance selon la relation (V-12) :

$$Q_s = a \cdot Q_L^b \quad (\text{V-12})$$

On choisit le modèle qui a le plus grand coefficient de corrélation (R) qui indique l'éloignement des points expérimentaux de la droite de régression. Ce coefficient est calculé par la méthode des moindres carrés. Le modèle en puissance représente la tendance globale des bassins versants méditerranéens à climat semi-aride où les conditions géo -morphométriques et hydro climatiques sont semblables entre elles (Terfous et al, 2001 ; Touaibia et al, 2001 ; Benkhaled et Remini, 2003 ; Bouanani, 2004 ; Achite et Meddi, 2005 ; Meguenni et Remini, 2008). La méthode de travail établie consiste à calculer les apports liquides, solides et la dégradation spécifique au niveau du bassin d'étude. Le flux annuel des matières solides A_s (t) en suspension exporté par l'Oued Lakhdar est donné par l'équation (V-13) :

$$A_s = \sum_{j=0}^N \frac{[(Q_{j+1} \cdot C_{j+1}) + (Q_j \cdot C_j)]}{2} (t_{j+1} - t_j) \quad (\text{V-13})$$

où C_j et C_{j+1} sont les concentrations relevées aux instants t_j et t_{j+1} correspondant respectivement aux débits liquides Q_j et Q_{j+1} , N est le nombre prélèvements effectués sur l'année considérée, $(t_{j+1} - t_j)$ est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs. L'apport solide spécifique est donné par l'équation (V-14) :

$$A_{ss} = \frac{A_s}{S} \quad (\text{V-14})$$

Les apports solides spécifiques sont en tonnes par kilomètre carré par an, A_{ss} ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) et la superficie du bassin en km^2 . L'apport liquide annuel A_L (m^3) est calculé par l'équation (V-15) :

$$A_L = \sum_{j=0}^N \frac{[(Q_{j+1} + Q_j)]}{2} (t_{j+1} - t_j) \quad (\text{V-15})$$

- V- 5.2. Répartition spatiale
- V- 5.2.1. Etude des tendances
- V- 5.2.1.1. A l'échelle instantanée

La quantité de précipitations a un impact significatif sur la dégradation des terres. Une averse à forte intensité peut provoquer des crues importantes qui entraînent l'érosion du sol. Le coefficient de corrélation très important étant de 0,8167, le modèle en puissance appliqué entre 1970 et 2021 est élevé. Au sein de cette étude, 1 958 de paires (débit liquide $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; débit solide $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) ont été analysés en utilisant des données mesurées instantanément pendant la période d'écoulement dans l'Oued Lakhdar. La figure V-15 présente une relation en puissance satisfaisante entre les débits liquide et solide, et le nuage de points est bien réparti autour de la droite de régression, avec un exemple de débits liquides très faibles équivalant à $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, correspondent à de faibles débits solides égale à $0,0001 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

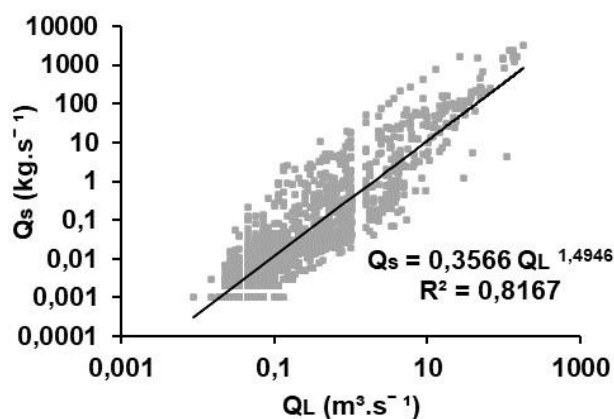


Figure V-15 Étude de la corrélation entre les débits solides et les débits liquides instantanés dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

Les valeurs du paramètre (a) de la relation (2), indiquent que le paramètre ($a = 0,3566$) de la droite en puissance est proche de celui des Oueds Isser et Mouillah respectivement de (0,32) et (0,4) (Bouanani, 2004) et les valeurs du paramètre (b) de la même relation montrent que ($b = 1,4946$) est proche de celle d'Oued chellif (1,44) (Bouchelkia, 2009), Oued Sikkak (1,47) (Bouanani et al, 2013). Ci-dessous, quelques valeurs des coefficients (a) et (b) dans les zones au Nord d'Algérie (Tableau V-13).

Tableau V-13 Les paramètres (a) et (b) dans les bassins nord-ouest algérien, (a : Paramètre ; b : Paramètre).

Bassin versant	a	b	Références
Oued Nachef	0,24	1,24	Kazi et al, 2017
Oued Boumesaoud	1,59	1,64	Bouguerra, et al, 2016
Oued Isser	0,32	1,76	Bouanani, 2004
Oued Mouillah	0,40	1,70	Terfous et al, 2001
Oued Chellif	1,62	1,44	Bouchelkia, 2009
Oued Sikkak	0,29	1,47	Bouanani et al, 2013

V- 5.2.1.2. A l'échelle saisonnière

Les valeurs instantanées des débits liquides en ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et des débits solides en ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) sont étudiées sur une échelle logarithmique. Les relations pour les données saisonnières sont illustrées par les graphes de la (figure V-16) et les corrélations obtenues sont toutes significatives et se situent dans l'intervalle (0,68-0,83), ce qui suggère que ces régressions ont donné des résultats satisfaisants. Les résultats obtenus pour la station du bassin versant Oued Lakhdar sont résumés dans le tableau V-14.

Tableau V-14 Résultats de l'analyse statistique de la relation $Q_s = f(Q_L)$ dans le bassin versant d'Oued Lakhdar, (R : Coefficient de corrélation ; Q_s : Débit solide(kg/s) ; Q_L : Débit liquide (m^3/s)).

Echelle temporelle	R ²	Modèle
Série complète	0,8167	$Q_s = 0,3566Q_L^{1,4946}$
Automne	0,8084	$Q_s = 1,0125Q_L^{1,8151}$
Hiver	0,8387	$Q_s = 0,218Q_L^{1,4345}$
Printemps	0,7804	$Q_s = 0,1934Q_L^{1,3807}$
Eté	0,6868	$Q_s = 0,0508Q_L^{0,8888}$

Afin d'évaluer l'évolution des débits solides à Oued Lakhdar, une analyse temporelle à diverses échelles a été réalisée. Les résultats obtenus (figure V-15) montrent qu'il existe une relation étroite entre le débit solide et le débit liquide caractérisant l'Oued Lakhdar et l'analyse graphique des relations obtenues, montre qu'à de faibles débits liquides (moins de $0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) enregistrés le 30 septembre 2009 peuvent être associés de forts débits solides (près de $4,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) déclenchés probablement à la suite d'orages violents de l'automne, de même des fortes valeurs du débit liquide ($3,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) n'ont engendré qu'un faible transport solide (moins de $0,54 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) enregistré le 11 décembre 2003 dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante de l'hiver, en revanche, durant l'été, on constate une

régression nette des débits liquides maxima qui ne dépassent pas les $0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vu l'inexistence d'écoulement durant cette saison.

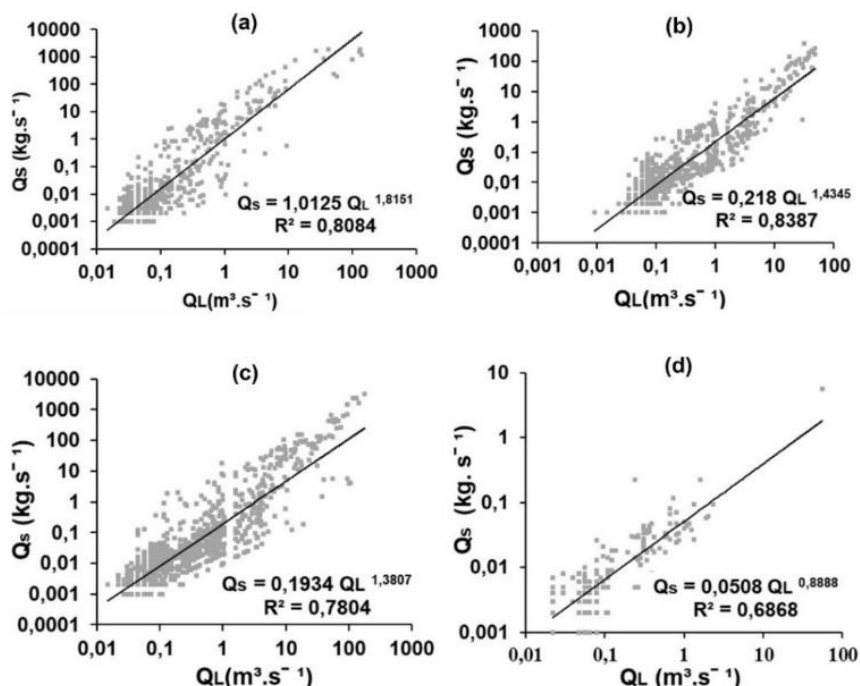


Figure V-16 Relation entre les débits liquides et solides instantanés (1970-2021) dans le bassin versant de l'oued Lakhdar, (a) automne, (b) hiver, (c) printemps, (d) été.

L'hiver (figure V-16-b) et le printemps (figure V-16-c) présentent des nuages de points plus épais que l'été (figure V-16-d) et l'automne (figure V-16-a). De plus, les débits liquides varient considérablement par rapport aux débits solides, ce qui entraîne une contribution significative des nappes dans l'écoulement pendant ces deux saisons et après la saison sèche de l'été.

Les premières précipitations automnales se produisent sur un sol sec et dur, ce qui entraîne la rupture des corrélations entre les particules du sol sans causer d'érosion significative. Ainsi, la réponse du bassin en matières en suspension est très faible en septembre.

Les fortes pluies d'octobre et de novembre, qui entraînent une érosion importante des sols et une réponse rapide du bassin, se traduisent par des ruissellements, suivis d'un hiver où la pluviométrie est importante et les écoulements encore plus intenses après les fortes pluies de l'automne.

V- 5.3. Bilan des apports solides

V- 5.3.1. Etude des tendances

V- 5.3.1.1. A l'échelle annuelle

Afin d'évaluer les apports solides pour la période de 1970 à 2021, la relation de la série complète a été utilisée. $Q_s = 0,3566Q_L^{1,4946}$. Les résultats montrent que les années 1972-1973, 2008-2009 et 2012-

2013 se caractérisent par des quantités de sédiments en suspension égales de plus de 16 000 t, ce qui indique la présence des crues surtout dans la saison d'automne qui induisent les quantités maximas des sédiments transportés en suspension par l'Oued Lakhdar.

Les crues dans cette saison favorisent le transport solide car elles sont caractérisées par une forte concentration. La dégradation spécifique est variable d'une année à l'autre, elle varie de 68 à 95 t. km⁻².an⁻¹. Le flux solide moyen annuel de la région de l'Oued Lakhdar est de 12 619 t (Figure V-17) représentant une détérioration particulière de 74 t.km⁻².an⁻¹. L'année 2008-2009 a représenté la plus importante contribution solide (16 294 t) de la période d'étude (1970-2021). L'étude des changements annuels des flux solides montrent une tendance globale à la baisse avec un coefficient de corrélation très faible (R² =0,08). On notera que ces valeurs se situent dans l'approximatif des dégradations trouvées dans d'autres zones en Algérie (tableau V-15).

Tableau V-15 Les dégradations spécifiques moyennes dans des zones en Algérie.

Bassin versant	Dégradation spécifique (t. km ⁻² .an ⁻¹)	Références
Meffrouche (Algérie)	39	Kazi et al,2017
Oued Saida (Algérie)	55	Yles et Bouanani ,2017
Abd (Algérie)	136	Achite et Ouillon ,2007
Sikkak (Algérie)	170	Bouanani ,2004
Mouillah (Algérie)	126	Terfous et al,2001
Algérie orientale	145	Bourouba,1998

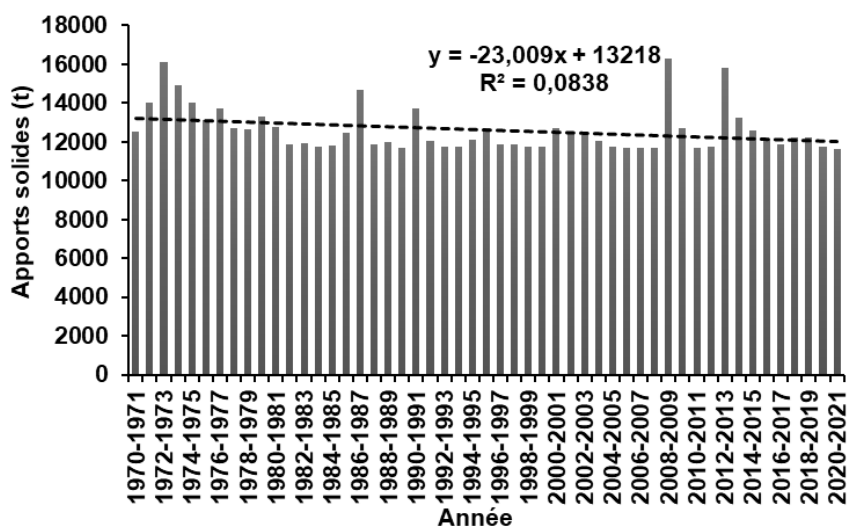


Figure V-17 L'évolution des apports solides de l'Oued Lakhdar entre 1970 et 2021.

La dégradation spécifique est de 95,85 t. km⁻².an⁻¹ de l'année 2008-2009 est remarquable durant cette année hydrologique, elle a engendré un apport solide de 16 294 t. Dans les zones semi-arides, ces valeurs remarquables sont dues à des facteurs hydro climatiques provoquant l'érosion des sols.

Toutefois, il est à signaler que la région d'étude de l'Oued Lakhdar est limitée par les bassins de Meffrouche, Sikkak et par l'Oued Isser. La valeur de la dégradation spécifique pour le bassin est semblable avec des valeurs publiées pour des zones situées au Nord d'Algérie. Ainsi, la valeur moyenne de la dégradation spécifique trouvée dans la zone de Meffrouche est de 39,42 t. km⁻².an⁻¹ (Kazi et al, 2017,2020). Le taux d'érosion varie entre 165 et 938 t. km⁻².an⁻¹ pour les bassins de Mouillah, Sebdu, Isser et de Sikkak (Bouanani, 2004). Les apports liquides, solides et spécifiques interannuels dépendent essentiellement de la pluviométrie de l'année considérée. La comparaison entre les valeurs extrêmes des apports solides spécifiques enregistrés dans le bassin versant d'Oued Lakhdar et celles attribuées par Bouanani (2004) à d'autres sous-bassins de la Tafna montre que la région subit la même ampleur du phénomène. Devant les contextes climatique et géologique semblables, la différence entre valeurs est liée principalement aux surfaces drainées (tableau V-16).

Tableau V-16 les valeurs extrêmes des (A_{ss}) enregistré dans quelques bassins versants du Nord-ouest Algérien, (A_{ss} : Apport solide spécifique).

Bassin versant	A _{ss} (t. km ⁻² .an ⁻¹)			Référence
	Minimum	Moyenne	Maximum	
Sebdu	107	938	3700	Bouanani (2004)
Mouillah	04	364	2200	Bouanani (2004)
Isser	04	180	1035	Bouanani (2004)
Sikkak	04	170	745	Bouanani (2004)
Oued Lakhdar	68	74	95	Diaf et Ghenim (2021)

IV- 5.3.1.2. A l'échelle saisonnière

Les précipitations sont faibles pendant l'été, ce qui rend l'analyse des résultats difficile en raison de l'absence d'écoulement. La valeur de 8 286 t observée à l'automne, qui représente 66 % des apports solides annuels, correspond à un apport spécifique de 48,74 t. km⁻². an⁻¹ (figure V-18). Cela explique que pendant l'automne et après une période sèche d'été prolongée, les premières pluies arrachent une quantité considérable de sol qui est finalement transportée par le fléau.

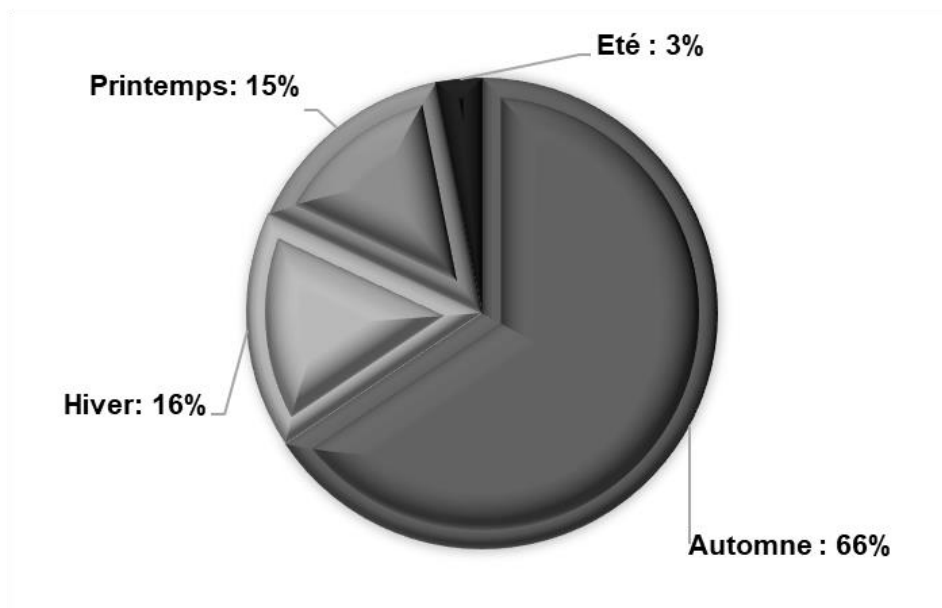


Figure V-18 Variation saisonnière des apports solides de l'Oued Lakhdar (1970-2021).

Le tableau V-17 récapitule les résultats des apports liquides et solides.

Tableau V-17 Variation saisonnières des apports liquides, solides et dégradations spécifiques dans le bassin versant d'oued Lakhdar (A_L : Apport liquide ; A_s : Apport solide ; A_{ss} : Apport solide spécifique).

	Unité	Automne	Hiver	Printemps	Été	Annuelle
A_L	Hm ³	0,769	3,082	4,122	0,511	8,486
A_s	t	8286,19	2054,25	1886,88	392,03	12619,36
A_{ss}	t. km ⁻² .an ⁻¹	48,74	12,08	11,09	2,30	74,23

Le transport solide de 2054 et 1886 t est observé en hiver et au printemps, représentant respectivement 16 et 15 % de l'apport annuel, avec un apport spécifique de 12,08 et 11,09 t. km⁻². an⁻¹. L'été ne constitue que 3 % du transport solide annuel, ce qui représente une contribution spécifique de 2,30 t. km⁻². an⁻¹ et une contribution solide de 392 t.

V- 5.3.1.3. A l'échelle mensuelle

Le flux moyen mensuel de matière solide transporté par l'Oued Lakhdar a été estimée à 1 051,61 t, avec un maximum enregistré au mois de novembre de 2 829,33 t et un minimum de 130,30 t au mois de juin (figure V-19).

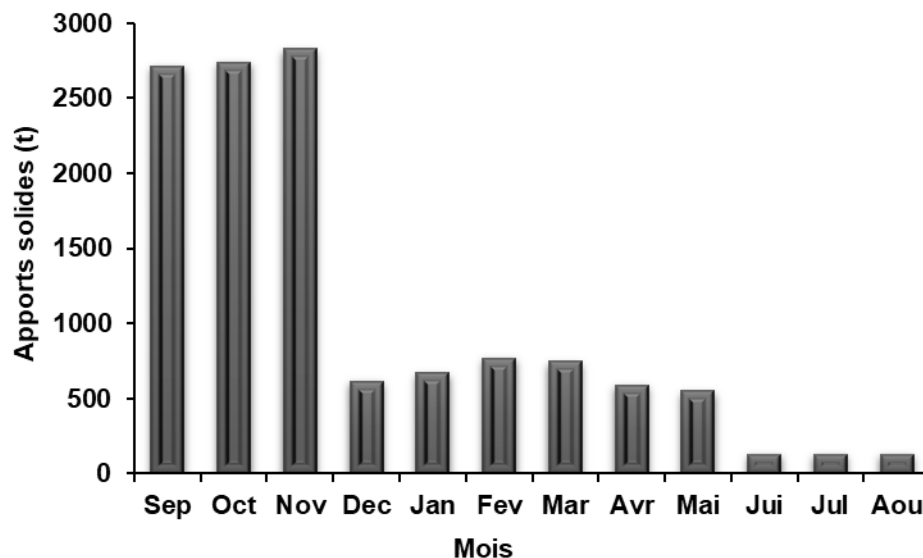


Figure V-19 Variation mensuelle des apports solides de l'Oued Lakhdar (1970-2021).

V- 5.4. La relation entre l'apport liquide et solide cumulé

V- 5.4.1. Etude des tendances

V- 5.4.1.1. A l'échelle annuelle

Une approche simple pour identifier l'influence du changement climatique sur la charge sédimentaire dans les bassins versants, qui utilise des données telles que celles présentées dans les figures V-19 et V-20, consiste à identifier les cas où les flux liquides montrent une augmentation ou une diminution statistiquement significative, qui est susceptible de refléter une augmentation ou une diminution des précipitations annuelles, et d'évaluer la tendance de la charge de sédiments. Parmi ces facteurs qui influent sur le transport des sédiments dans les bassins-versants sont de l'intensité et de la sévérité des précipitations. Le changement de la pluviométrie depuis les années 1970 jusqu'au 2021 dans la région d'étude ont produit la dégradation des terres au cours de toute l'année. Plusieurs études ont montré une variabilité entre les précipitations, les apports liquides et les apports solides ([Bouanani, 2004](#) ; [Achite et Ouillon, 2007](#)).

Le caractère du transport en suspension a été étudié on analyse la relation entre l'apport liquide et les précipitations, à cet effet nous sommes intéressés aux flux liquides et solides cumulés. L'analyse des flux solides cumulés révèle une tendance globale à la hausse, passant de 12558 t en 1970 à 643587 t en 2021 (figure V-20) avec un coefficient de corrélation très fort $R^2 = 0,99$ et une progression très régulière, il augmente successivement et parfaitement (1970-2021), par ailleurs, le flux liquide cumulé est caractérisé par une rupture brutale qui divise la série d'étude en deux parties, l'une de la période 1970-1980 avec un passage de flux liquide de 10 à 168 Hm³ et une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation $R^2 = 0,95$ et l'autre de la période 1980-2021 avec une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation $R^2 = 0,97$ et un apports liquides cumulés passant de 168 à 432 Hm³, cet rupture et changement due essentiellement à la variation des précipitations

annuelles distingué passant de 186 à 701 mm avec une moyenne de 429 mm, qui peuvent transporter des quantités importantes de sédiments.

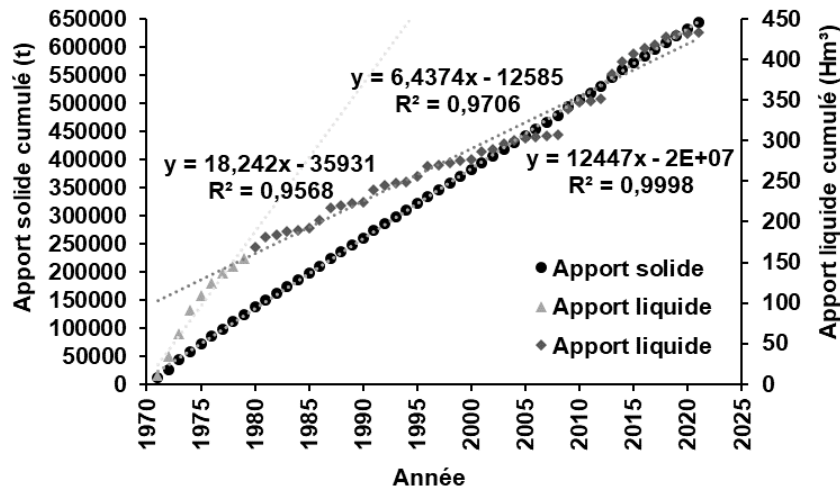


Figure V-20 Les apports cumulés annuels dans la région d'Oued Lakhdar (1970-2021).

V- 5.4.1.2. A l'échelle saisonnière

L'étude des fluctuations saisonnières des flux solides cumulés révèle une tendance générale à l'augmentation pour les quatre saisons, passant de 387 à 422 595 t, (figure V-21). Le coefficient de corrélation est élevé ($R^2 = 0,99$) pour l'automne, l'hiver et le printemps, et ($R^2 = 1$) pour l'été en raison du faible nombre d'observations.

D'autre part le flux liquide cumulé est caractérisés par les deux premiers saisons (automne et hiver) avec une rupture de la période 1970 jusqu'au 1980 avec un apport liquide de (0,5 à 43Hm³) et une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation ($R^2 = 0,99$) et l'autre période de 1980 jusqu'au 2021 avec un apport liquide passant de 10 à 210 Hm³ et une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation ($R^2 = 0,98$ et $R^2 = 0,99$).

Dans le printemps et l'été on distinguent l'apports liquides qui passent de 1 à 76 Hm³ dans la période de 1970 aux 1975 pour le printemps et de 1970 aux 1977 pour l'été, avec une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation $R^2 = 0,99$ pour les deux saisons, et un passage de 10 à 210 Hm³ dans la période de 1975 aux 2021 pour le printemps et de 1977 aux 2021 pour l'été, avec une tendance globale à la hausse et un coefficient de corrélation $R^2 = 0,98$ et $R^2 = 0,99$ successivement, cet changement liées directement à la variation brutale des précipitations moyennes enregistré de l'automne (108 mm) en allant vers l'hiver (160 mm) et de printemps (142 mm) en allant vers l'été (18 mm), cette période est marquée par un manque de pluie et donc un écoulement superficiel faible.

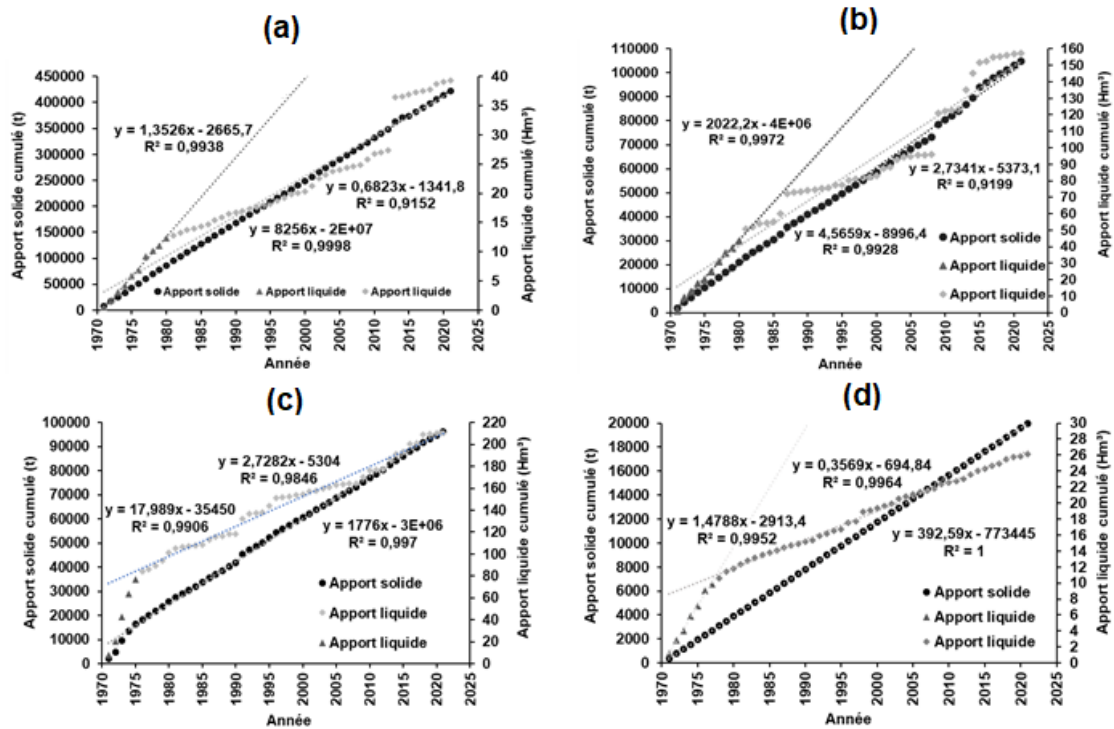


Figure V-21 Les apports cumulés saisonnières dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021), (a) Automne, (b) Hiver, (c) Printemps, (d) Eté.

Conclusion

Notre chapitre a pour but de contribuer à l'hydrologie et à évaluer quantitativement l'érosion hydrique en utilisant des techniques spatiales et d'autre part d'analyser les phénomènes de transport solide dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar, situé au nord-ouest de l'Algérie. L'observation des précipitations entre 1970 et 2021 montre une tendance globale à la baisse des apports pluviométriques. Les précipitations annuelles maximales ($P_{\text{max}} = 701 \text{ mm}$) enregistrées en 2008-2009 dépassent la moyenne annuelle ($P_{\text{moy}} = 429 \text{ mm}$), signe d'une très grande irrégularité et de grandes variations des précipitations. Notons également que les précipitations annuelles minimales sont égales à 186 mm. L'analyse des variations saisonnières des précipitations montre une diminution des apports pluviométriques et une précipitation moyenne saisonnière maximale égale à 160 mm enregistrée en hiver avec une valeur maximale enregistrée en 2008-2009 égale à 374 mm. Ceci est le signe d'une irrégularité et de grandes variations des précipitations.

L'analyse des périodes saisonnières dans la zone d'étude est accompagnée d'une certaine divergence quant à la réaction hydrologique du bassin aux différentes précipitations. Par conséquent, la pluviométrie maximale a été observée en mars avec une pluviométrie moyenne de 62 mm. Il convient de souligner que l'hiver est le mois où le taux de précipitations est le plus élevé, avec une moyenne mensuelle de 53 mm. Par contre, en automne la hauteur moyenne précipitée est de 36 mm avec un écoulement de 1,9 mm et au printemps la hauteur moyenne précipitée est de 47,4 mm avec un écoulement de 9,2 mm. Le sol est complètement sec lors des premières pluies d'automne, qui se manifestent sous forme d'averses intenses, ce qui entraîne une augmentation soudaine du ruissellement. Ce n'est qu'en mars, à la pleine des nappes et à la saturation du sol, que les maximas des lames évacuées sont équivalents aux maximas des lames précipitées. Les eaux de pluie de ce bassin s'infiltrent en hiver grâce à un réseau de failles et de formations karstiques, ce qui permet de remplir les réserves souterraines.

La variation des précipitations moyennes journalières est importante ; on observe une irrégularité des précipitations avec une diminution significative enregistrée pendant la saison estivale. Cette répartition a montré que les jours sans pluie sont remarquables en été, et que les fortes pluies et écoulements sont présents en périodes d'automne et d'hiver.

Le climat de la zone d'étude est semi-aride, caractérisé au cours de l'année par deux saisons principales, qui divisent le cycle climatique en deux périodes principales. Les valeurs fournies à la station de Meffrouche ont permis de distinguer un semestre inférieur à la moyenne mensuelle égale à 16,4°C et moyenne annuelle égale à 16,9°C, dont la température minimale est autour des 9,5°C et l'autre moitié sèche et chaude avec une température maximale estimée à 26,1°C enregistrée au mois d'août. La zone d'étude connaît des vagues de chaleur et des épisodes et phénomènes qui se présentent comme la sécheresse du fait du réchauffement climatique avec des hivers froids et des étés chauds avec des moyennes journalières maximales égales à 29,1°C et minimales égales à 4,1°C. L'analyse des variations interannuelles des débits entre 1970 et 2021 montre une diminution des apports liquides ; sachant que le débit annuel maximal ($Q_{\text{max annuel}} = 1,02 \text{ m}^3/\text{s}$) enregistré en 2008-2009 dépasse la moyenne annuelle ($Q_{\text{moy}} = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$). Notons également que le débit annuel minimal est égal à 0,02 m^3/s . L'observation des variations journalières des débits moyens montre une perturbation tout au long de l'année avec un débit maximal égal à 2,2 m^3/s et un minimal égal à 0,04 m^3/s .

La carte de l'érosion des versants fournit de nombreuses informations sur la sédimentation associée à la dégradation des terres et à la détermination des régions sources de production des sédiments. Dans la région d'Oued Lakhdar, l'étude menée par RUSLE a montré une dégradation des terres en nappe de 8,43 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, dépassant ainsi le seuil de perte de sol linéaire estimé à 0,74 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, en se basant sur les mesures des concentrations réalisées par l'ANRH à la station hydrométrique.

Selon une loi en puissance de la forme $Q_s = 0,3566Q_L^{1,4946}$, les débits solides sont différents des débits liquides. Cette relation a été utilisée pour calculer le débit solide à diverses échelles pour une période de référence de 52 ans, allant de 1970/1971 à 2020/2021. Le poids des particules solides transportées par l'Oued Lakhdar a été estimé grâce aux résultats obtenus. Ces résultats ont démontré que le déplacement des particules solides en suspension dans le bassin se produit principalement pendant la saison d'automne (66 %), bien moins en hiver (16 %), au printemps (15 %) et presque nuls en été (3 %), par rapport aux sédimentations à l'exutoire de la zone d'étude évalué à 12 619 (t). Cela correspond à une perte des terres spécifique moyenne de 74 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. C'est une valeur qui semble raisonnable par rapport à celle observée dans les autres régions à climat semi-aride. On a observé cette variation annuelle des apports solides, avec une capacité de dégradation des sols qui varie selon les périodes humides et sèches respectivement.

Les quantités des particules solides déplacées par l'Oued varient d'une année à l'autre. Par exemple, sur deux années consécutives, elles fluctuent entre 11 685 $\text{t}\cdot\text{an}^{-1}$ pour l'année 2007-2008, ce qui représente une dégradation spécifique de 68,73 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$, et 16 294 $\text{t}\cdot\text{an}^{-1}$ pour l'année 2008-2009, ce qui représente une dégradation spécifique de 95,85 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$.

Chapitre VI

Etude des crues dans la zone d'étude

Introduction

Le changement climatique a des répercussions sur le cycle hydrologique, ce qui a un effet sur la disponibilité des ressources en eau et leur gestion. Les pluies, le principal phénomène hydrométéorologique et la principale source d'eau, peuvent augmenter ou diminuer en fonction de la géographie et de l'emplacement, de la circulation générale de l'air, de la proximité des zones côtières et de la géomorphologie.

L'analyse des périodes de crues est essentielle, car elles ont un impact significatif sur le bilan d'exportation des particules. De plus, elles facilitent la compréhension des mécanismes de transfert des particules du sol vers l'eau de surface et leur dynamique au cours du transport dans un domaine naturel (Bouanani et al., 2013, Megnounif et al., 2013).

Notre chapitre vise principalement à établir la corrélation entre la concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide Q_L lors d'événements hydrologiques extrêmes tels que les crues. L'objectif de cette section est de simplifier la mesure des déplacements de sédiments évacués par les crues d'Oued Lakhdar, qui pourraient s'accumuler au barrage d'El Izdihari. Enfin, le phénomène d'hystérésis dans les relations a été mis en lumière (C/Q_L).

VI- 1. Évaluation des crues (1970-2021)

Pour étudier l'évolution des événements extrêmes de crue, des données ont été acquises auprès de l'Agence nationale des ressources hydrologiques (ANRH). Les données englobent la station hydrométrique de Chouly est stratégiquement située à l'exutoire de la zone d'étude. La période de collecte des données s'étend de 1970 à 2021. Le tableau VI-1 fournit un aperçu détaillé de station, y compris leurs coordonnées.

Les inondations prises en compte sont celles qui dépassent largement le débit moyen annuel et qui sont marquées par une variation significative du débit liquide. Dans le cadre de cette expérience, 70 crues ont été étudiées (figure 1-a-b-c-d-e-f-g). Les débits et les niveaux d'eau des crues ont connu une variation très importante.

Tableau VI- 1 Coordonnées des stations du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Nom de la station	Type de jauge	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période
Chouly	Débits des crues	01°8'5"W	34°51'52"N	722	1970-2021

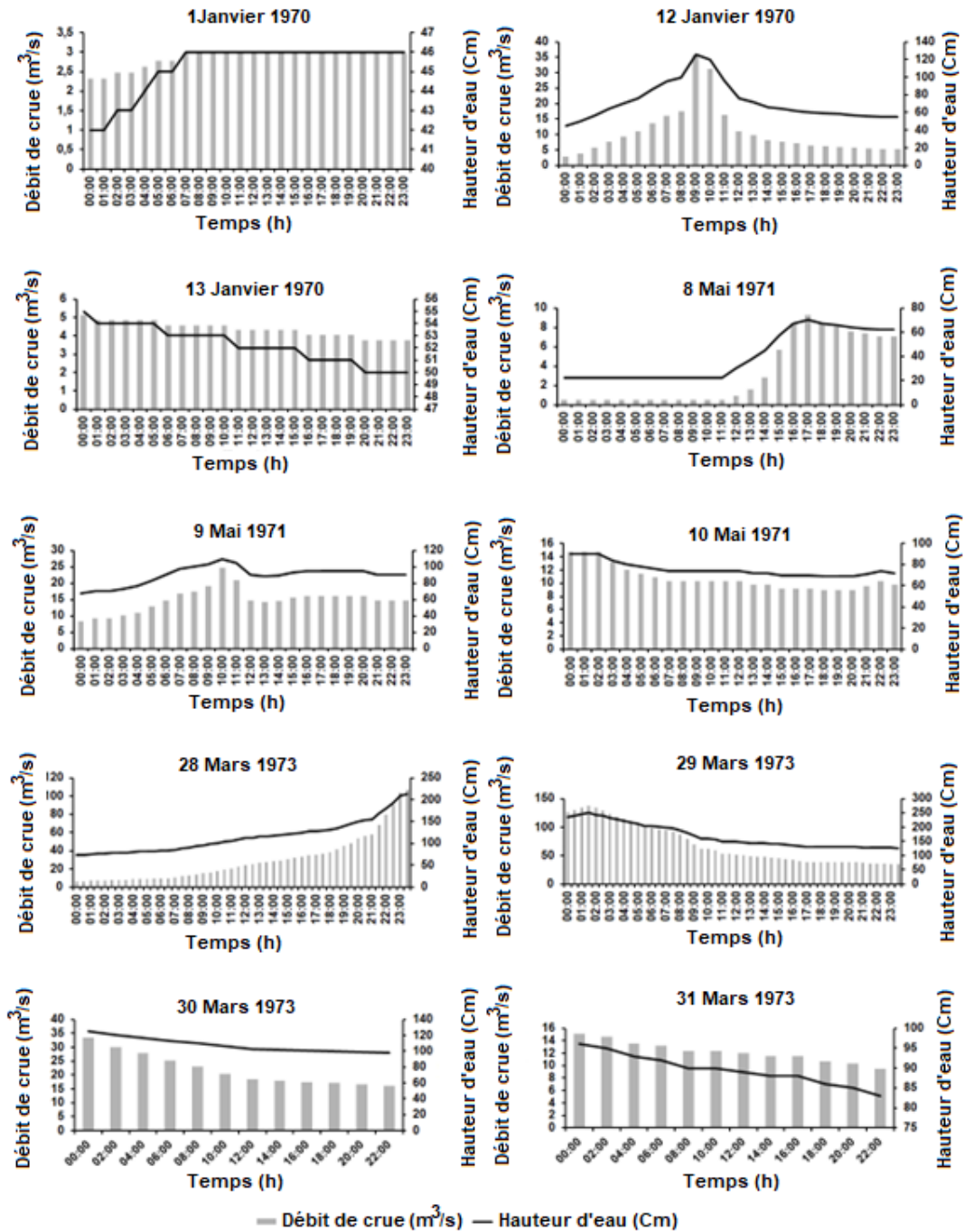


Figure VI-1. (a) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

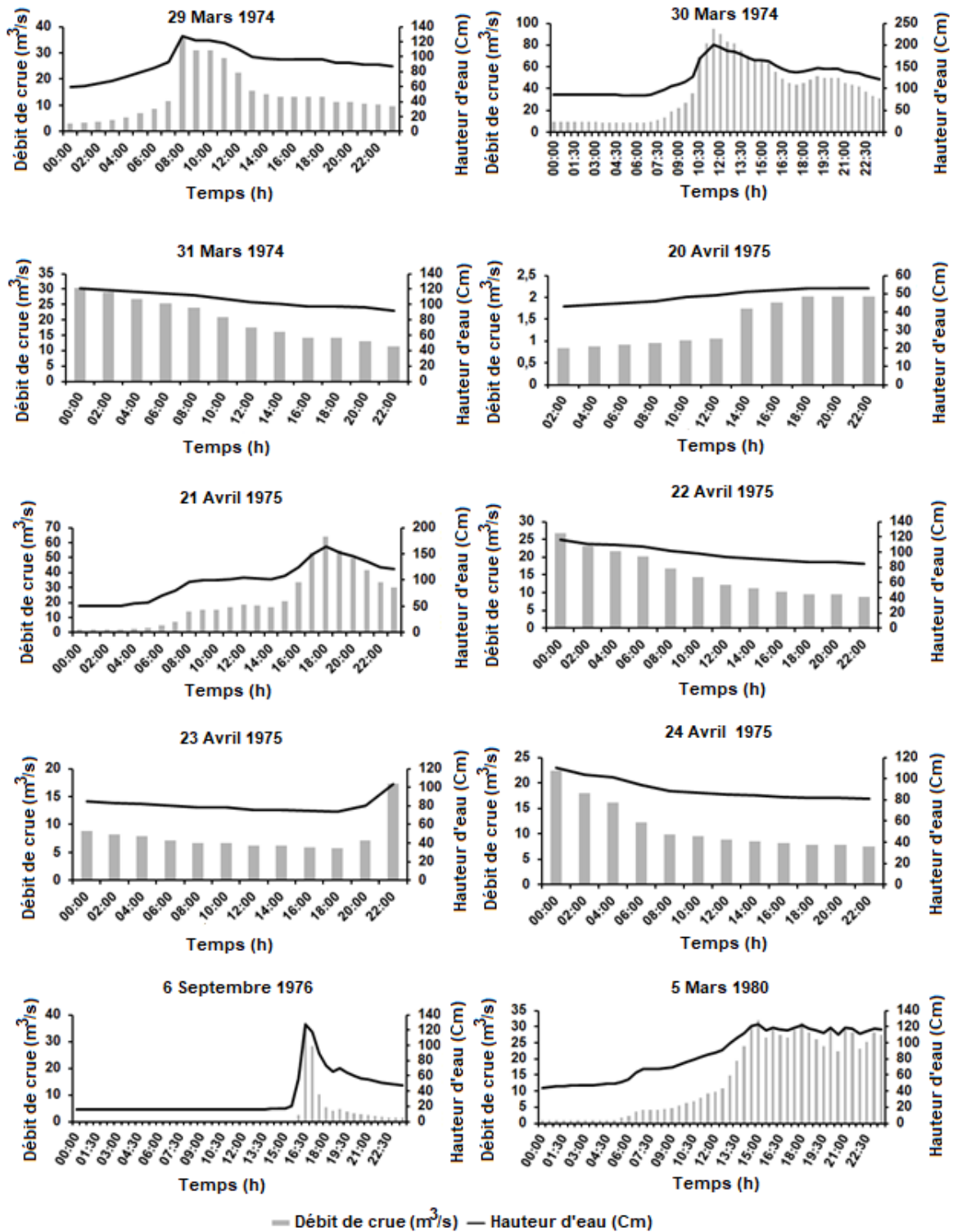


Figure VI-1. (b) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

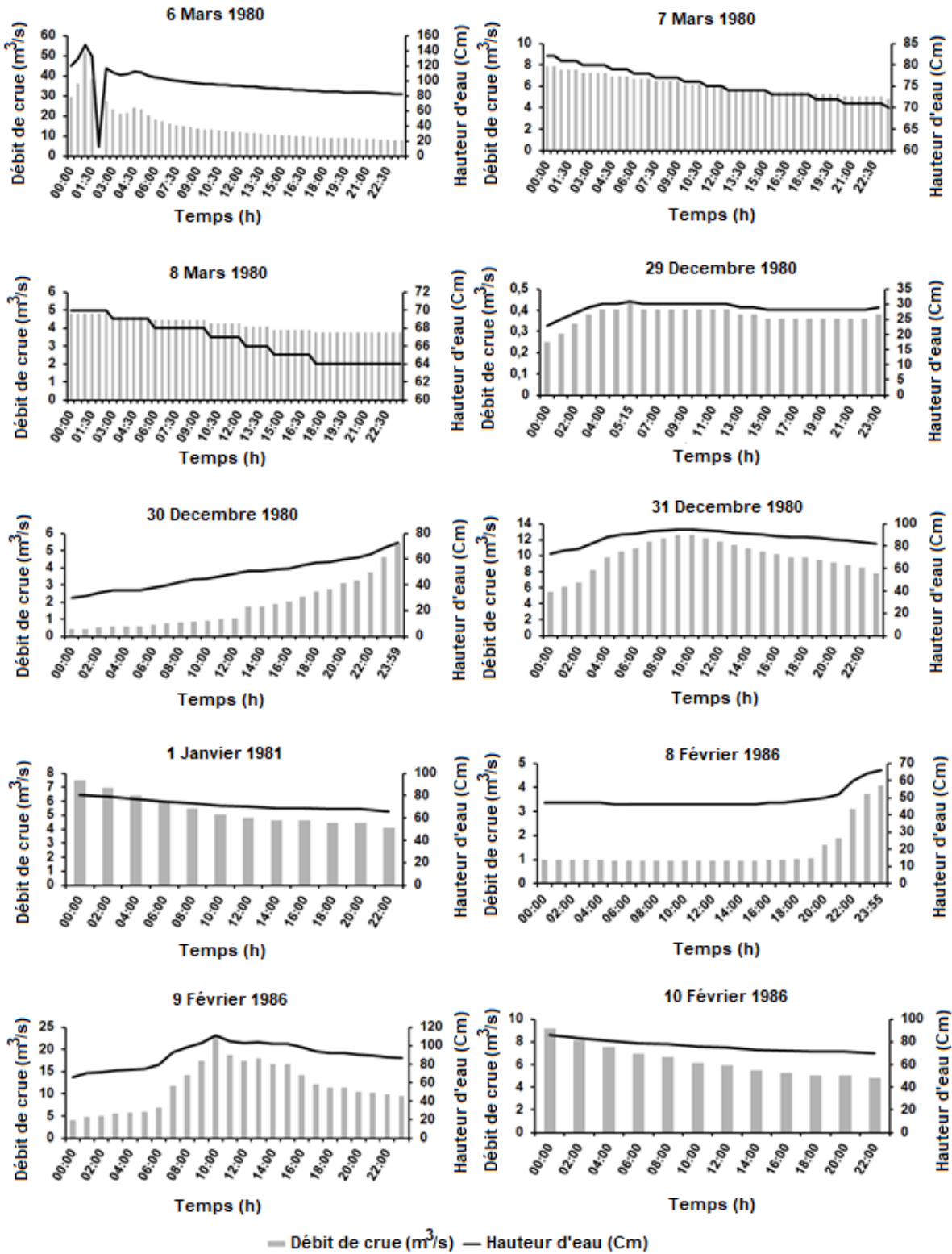


Figure VI- 1. (c) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

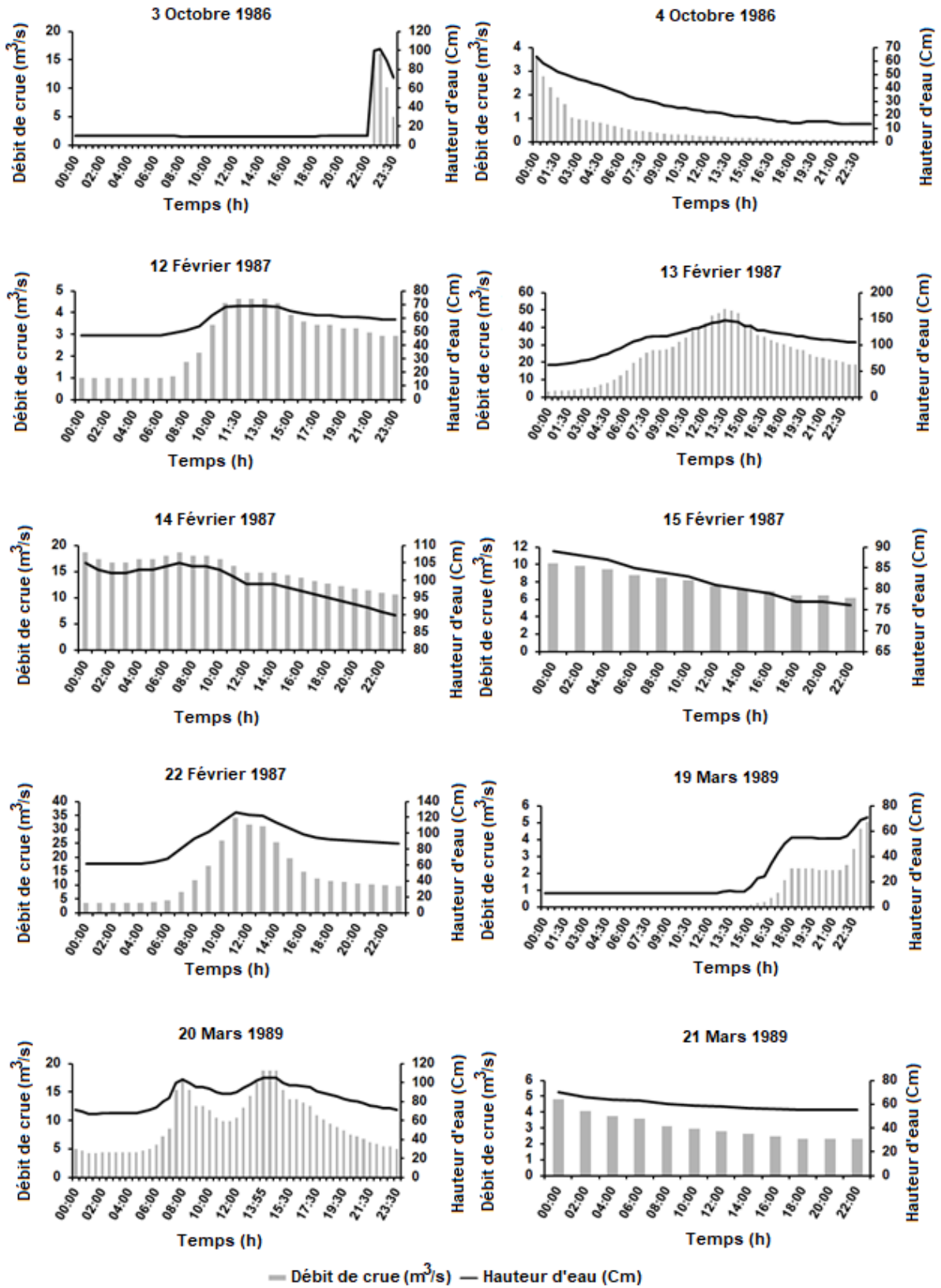


Figure VI-1. (d) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

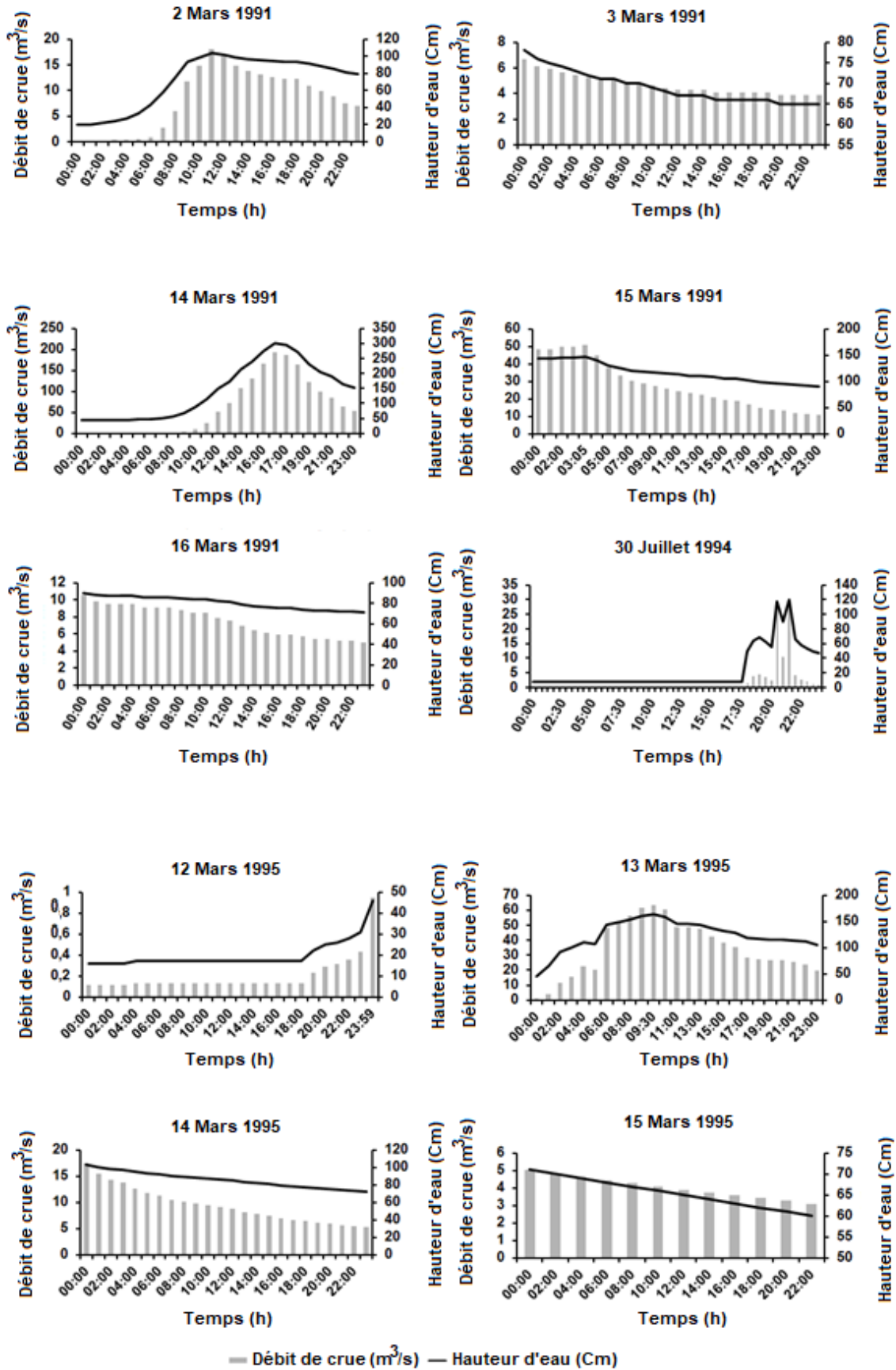


Figure VI-1. (e) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

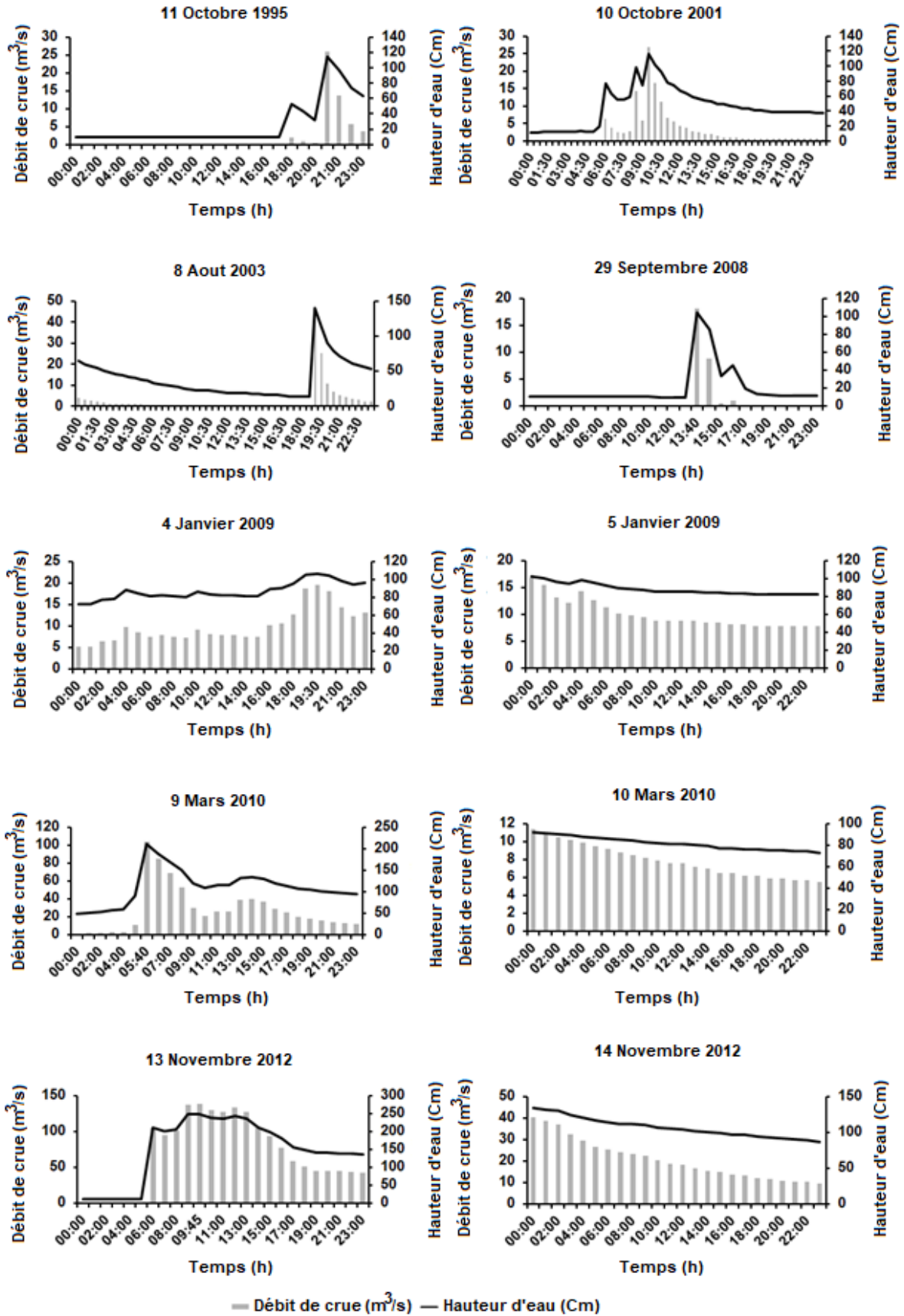


Figure VI-1. (f) Inondations dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

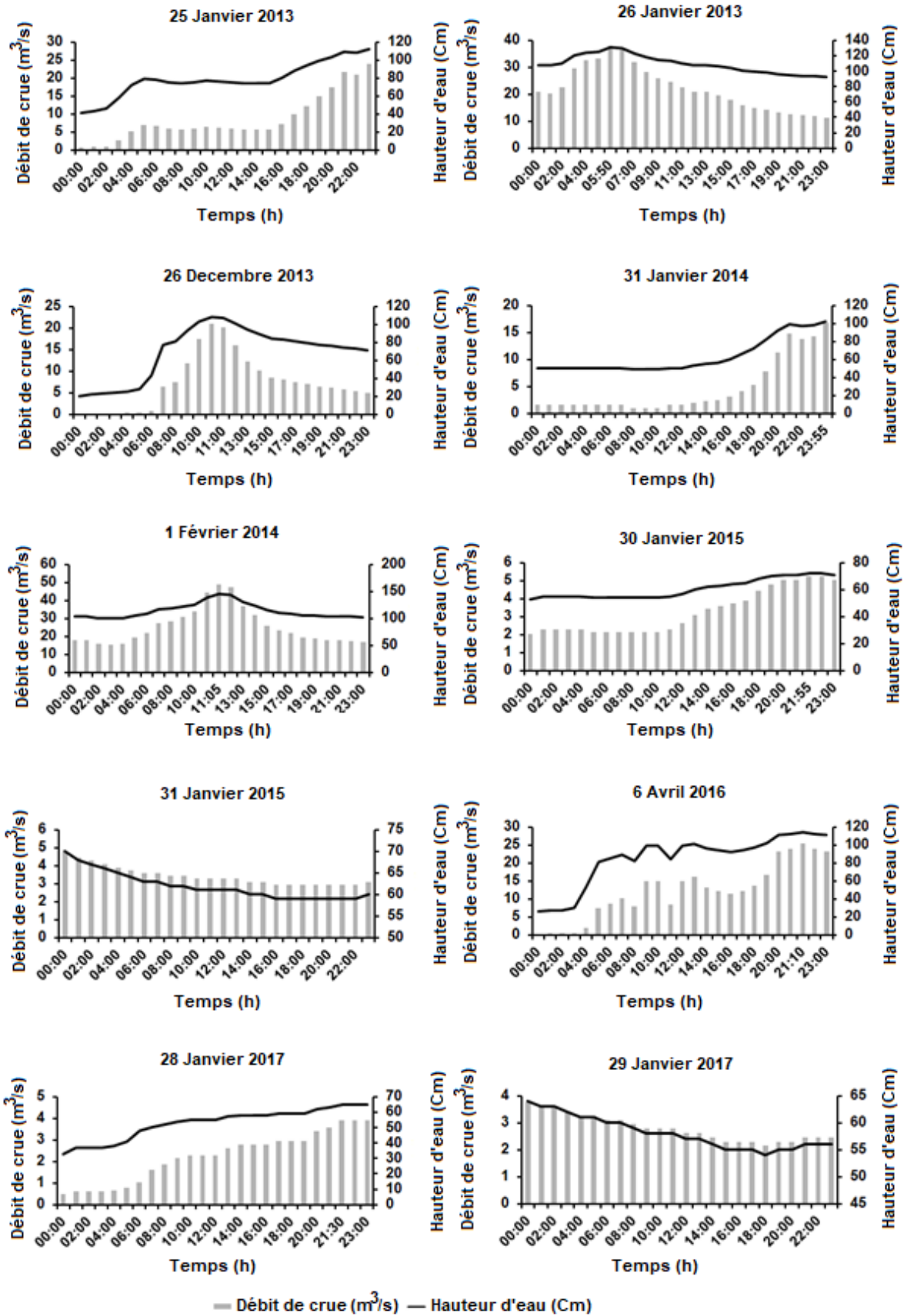


Figure VI-1. (g) Inondations (1970-2021) dans le bassin versant d'Oued Lakhdar.

L'analyse de 70 inondations constatées dans la région d'étude (1970-2021) a montré une variabilité importante des débits liquides et des hauteurs d'eau, en ce qui concerne le risque d'inondation, qu'il affecte les communautés ou les infrastructures hydrauliques comme le transport solide et l'envasement des barrages, nous étudions les inondations et constatons que les inondations printanières sont plus risquées que les inondations estivales et hivernales. Avec des débits et des hauteurs d'eau importants qui peuvent atteindre des valeurs maximales successives de $138 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et 2,5 m enregistrées le 29 mars 1973, les inondations printanières sont la saison la plus notable depuis 52 ans. Les inondations hivernales et estivales, à l'exception de la crue hivernale enregistrée les 25 et 26 janvier 2013, avec un débit de crue égal à $37,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et une profondeur d'eau de 1, 31 m, n'ont montré aucune tendance discernable. Cependant, des études scientifiques comparables sur les graves inondations ont été menées en Algérie, notamment : (*Otmane et al., 2018 ; Sadeuk Ben Abbes, 2020 ; Boutaghane et al., 2021*).

VI- 2. Les crues significatifs (1970-2021)

L'étude des 33 inondations extrêmes a montré que les inondations d'automne et de printemps sont plus dangereuses que les inondations d'hiver et d'été. En termes de changement climatique, les valeurs extrêmes des crues des saisons peuvent être analysées (Figure VI-2,3,4 et 5). Parmi les plus importantes crues extrêmes (1970-2021) : 28,29 et 30 mars 1973 ; 30 mars 1974 ; 5 et 6 mars 1980 ; 10 octobre 2001 ; 9 mars 2010 ; 13,14 et 15 novembre 2012 ; 25,26 janvier 2013 et 6,7 avril 2016.

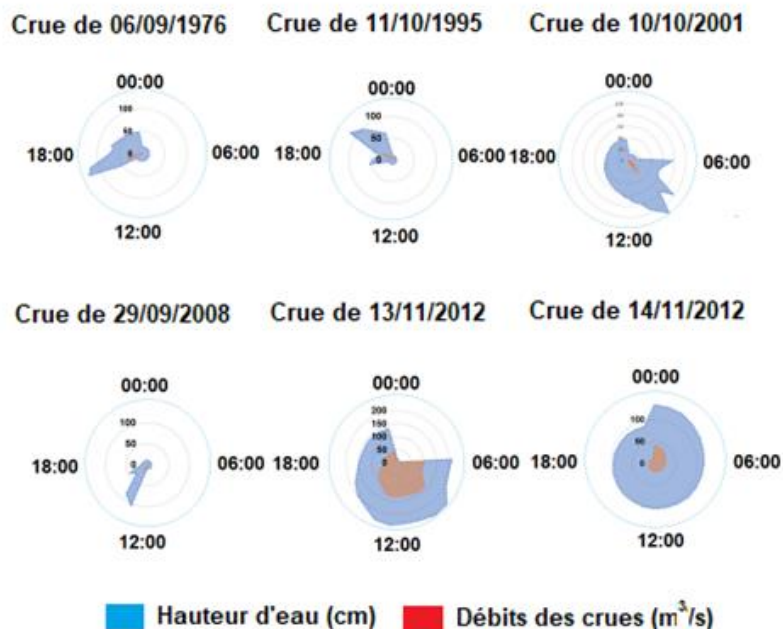


Figure VI- 2 Crue d'automne : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

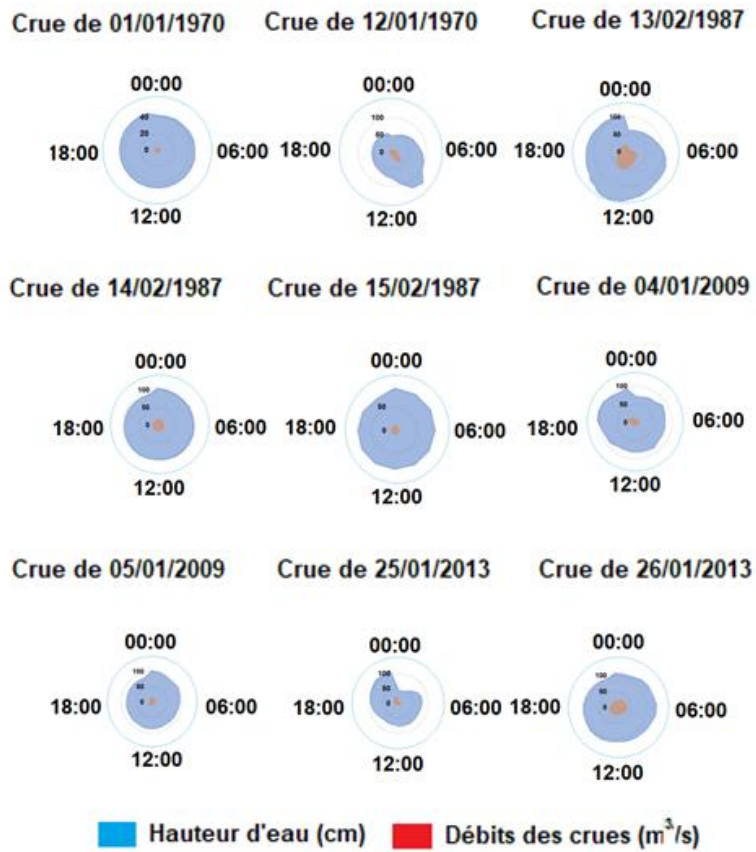


Figure VI-3 Crue hivernale : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

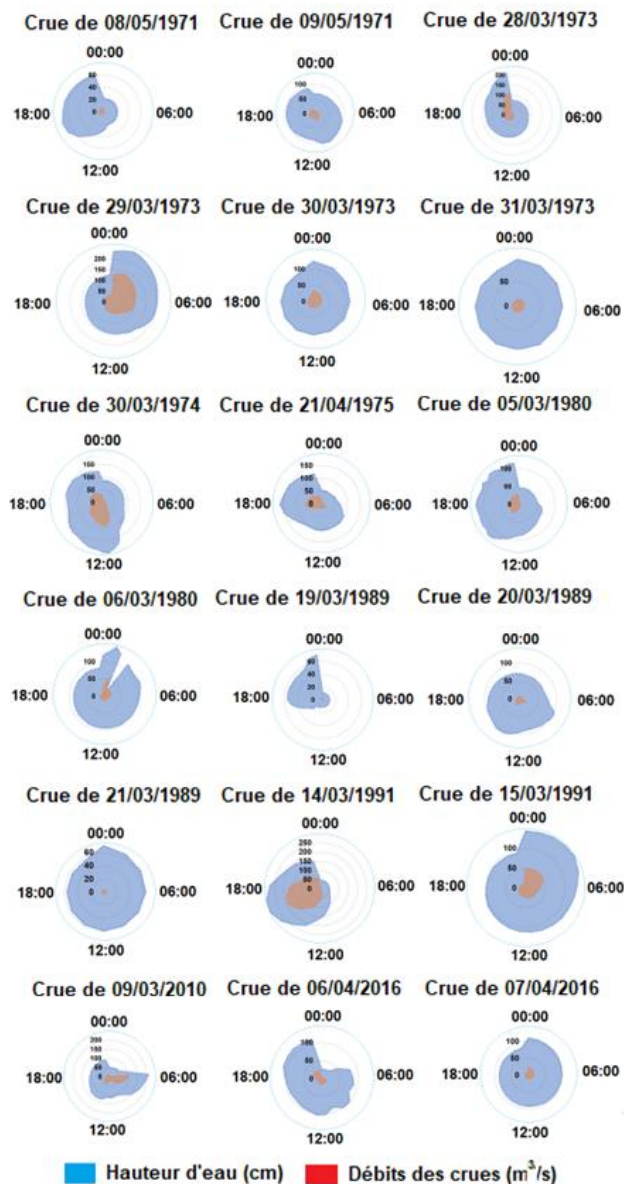


Figure VI- 4 Crue printanière : Variation des débits de crue et des niveaux dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

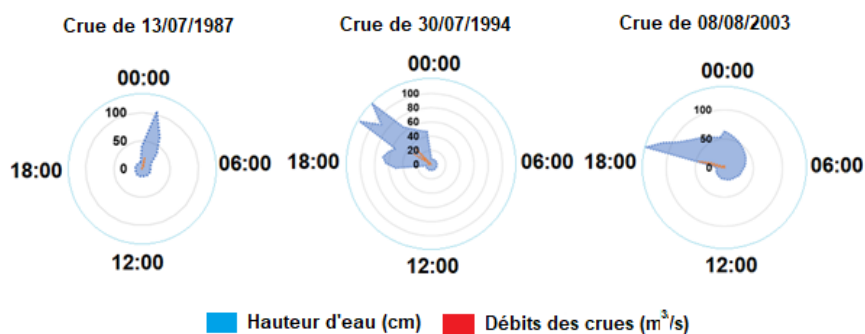


Figure VI- 5 Crue estivale : Variation des débits de crue et des niveaux d'eau dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021).

VI- 3. Concentration et agressivité

VI- 3.1. Exposé du problème d'hystérésis dans les relations (C/Q_L)

Pour 20 crues enregistrées à l'Oued Lakhdar, les graphes représentant C en fonction de Q_L révèlent trois modèles de courbes d'hystérésis : dans le sens antihoraire, en forme de huit et dans le sens horaire. L'étude des liens entre les hystérésis, pour 20 crues étudiées dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar (1970-2021), permet de classer les diverses hystérésis telles que définies par *Williams (1989)*, (Tableau VI-2).

Les graphes temporels et celui de l'hystérésis sont représentés en figure VI-6-a-b-c-d-e-f-g-h-i-j pour les crues d'automne, en figure VI-6- k-l-m-n-o pour les crues d'hiver et en figure VI-6-p-q-r-s-t pour les crues de printemps.

Tableau VI-2 Classes des relations (C/Q_L) d'après *Williams (1989)*. (C : Concentration des sédiments (g/l) ; Q_L : Débit liquide (m³/s) ; m : montée ; d : décrue).

Classe	Modèle	Critère (C/Q _L)
I	<ul style="list-style-type: none"> • Courbe simple (single line), ligne droite. • Courbe, la pente croit quand Q_L augmente. • Courbe, la pente décroît quand Q_L augmente. 	<ul style="list-style-type: none"> • (C/Q_L) m=(C/Q_L) d. Les pentes des deux sections montée et décrue sont égales. • Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales. • Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.
II	<ul style="list-style-type: none"> • Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). 	<ul style="list-style-type: none"> • (C/Q_L) m>(C/Q_L) d. Pour toutes les valeurs de Q_L. • (C/Q_L) m <(C/Q_L) d. Pour toutes les valeurs de Q_L
III	<ul style="list-style-type: none"> • Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). 	<ul style="list-style-type: none"> • (C/Q_L) m=(C/Q_L) d. Pour une partie des valeurs de Q_L
IV	<ul style="list-style-type: none"> • Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop). 	<ul style="list-style-type: none"> • (C/Q_L) m>(C/Q_L) d. Pour l'autre partie des valeurs de Q_L • (C/Q_L) m>(C/Q_L) d. Pour une partie des valeurs de Q_L
V	<ul style="list-style-type: none"> • Forme en huit (figure eight). 	<ul style="list-style-type: none"> • (C/Q_L) m<(C/Q_L) d. Pour l'autre partie des valeurs de Q_L

Les 20 inondations étudiées sont celles qui entraînent une forte fluctuation du débit liquide et dépassent le débit moyen global annuel. Au cours de cette expérience et tout au long de la période d'étude (1970-2021), un total de 20 crues a été étudiées, avec une variation de la concentration des matières en suspension observée (Tableau VI-3).

Tableau VI-3 Bilan des concentrations, débits liquides et solides pendant les crues enregistrées à la station de Chouly située dans le bassin versant d'Oued Lakhdar (1970-2021). (C_{max} : Concentration maximale des sédiments (g/l) ; $Q_{L\ max}$: Débit liquide maximale (m^3/s) ; $Q_{S\ max}$: Débit solide maximale (kg/s)).

Figures	Crues	Saisons	C_{max} (g/l)	$Q_{L\ max}$ (m^3/s)	$Q_{S\ max}$ (kg/s)
Figure VI-6-a	09/11/1971	Automne	6,42	3,76	24,13
Figure VI-6-b	06-07/09/1976	Automne	43,22	42,6	1841,17
Figure VI-6-c	10-13/11/1984	Automne	3,94	3,58	14,10
Figure VI-6-d	03-04/09/1986	Automne	61,7	12,6	777,42
Figure VI-6-e	18/11/1986	Automne	1,96	0,62	1,21
Figure VI-6-f	08/10/1987	Automne	21,36	2,3	49,12
Figure VI-6-g	02-06/10/1995	Automne	8,54	2,3	19,64
Figure VI-6-h	23-31/10/2000	Automne	13,08	5,24	68,55
Figure VI-6-i	04-06/11/2008	Automne	7,7	9,14	70,37
Figure VI-6-j	13/11/2012	Automne	13,9	132,8	1845,92
Figure VI-6-k	11-12/01/1970	Hiver	12,5	31,31	391,4
Figure VI-6-L	08-09/02/1986	Hiver	4,44	19,44	86,31
Figure VI-6-m	03-06/02/1987	Hiver	2,36	3,42	8,07
Figure VI-6-n	12-14/02/1987	Hiver	5,64	48,2	271,84
Figure VI-6-o	22/02/1987	Hiver	3,32	34,04	113,03
Figure VI-6-p	30/03/1974	Printemps	7,76	81,5	632,44
Figure VI-6-q	20-24/04/1975	Printemps	3,44	13,72	47,19
Figure VI-6-r	03-08/03/1980	Printemps	4,16	31,82	132,37
Figure VI-6-s	02/03/1991	Printemps	7,6	5,9	44,84
Figure VI-6-t	14-15/03/1991	Printemps	20,2	118,4	2391,68

Les concentrations les plus basses sont observées lors des d'inondations d'hiver et de printemps, avec des valeurs maximales de $12,5\ g.l^{-1}$ et $20,2\ g.l^{-1}$ respectivement. Cependant, la saison d'automne est la plus dégradante car les pluies tombent sur une surface asséchée, ce qui entraîne une augmentation de la concentration des matières en suspension, pouvant atteindre une valeur maximale de $61,7\ g.l^{-1}$.

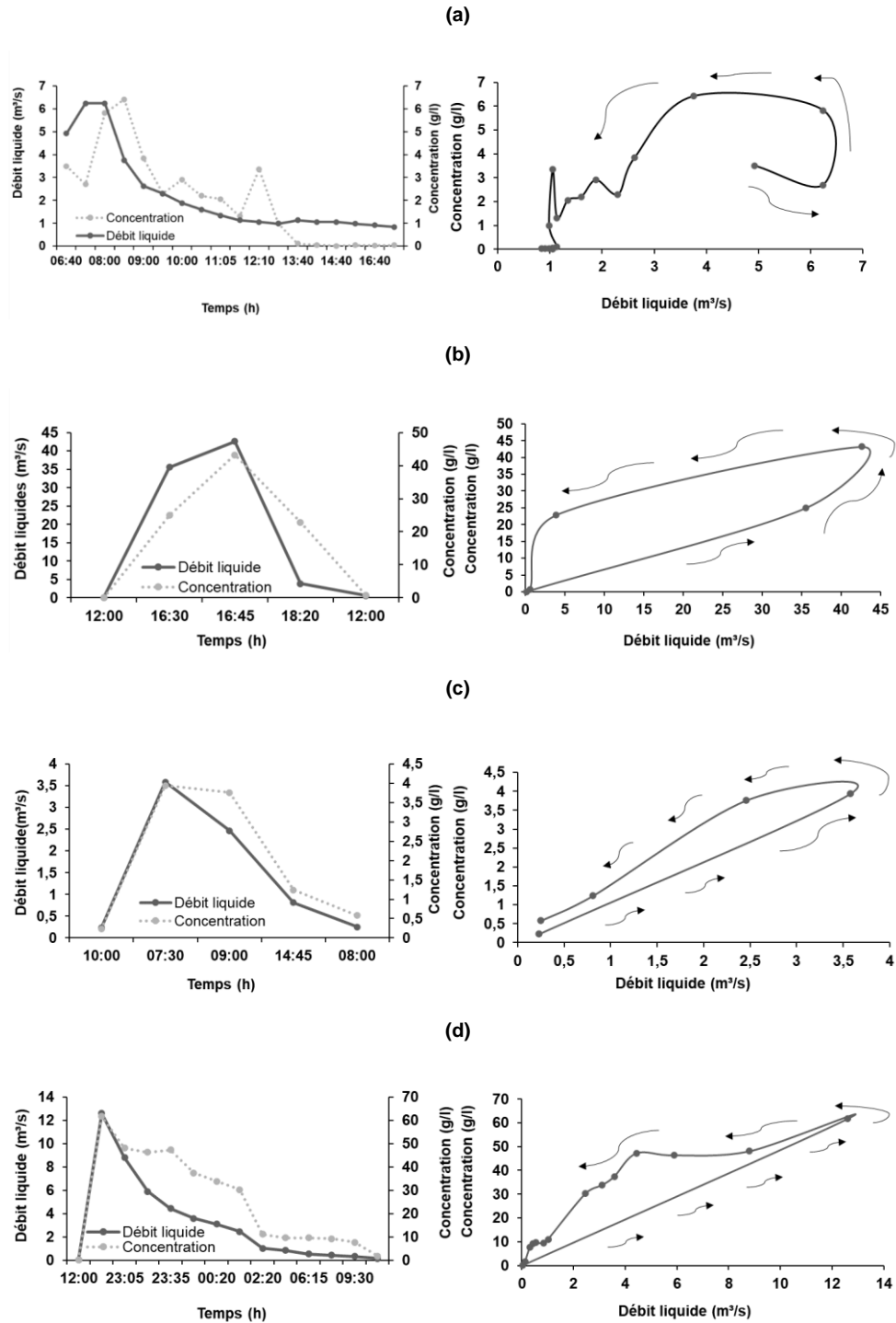


Figure VI-6-a-b-c-d Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q_L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (a-b-c-d) les crues d'automne.

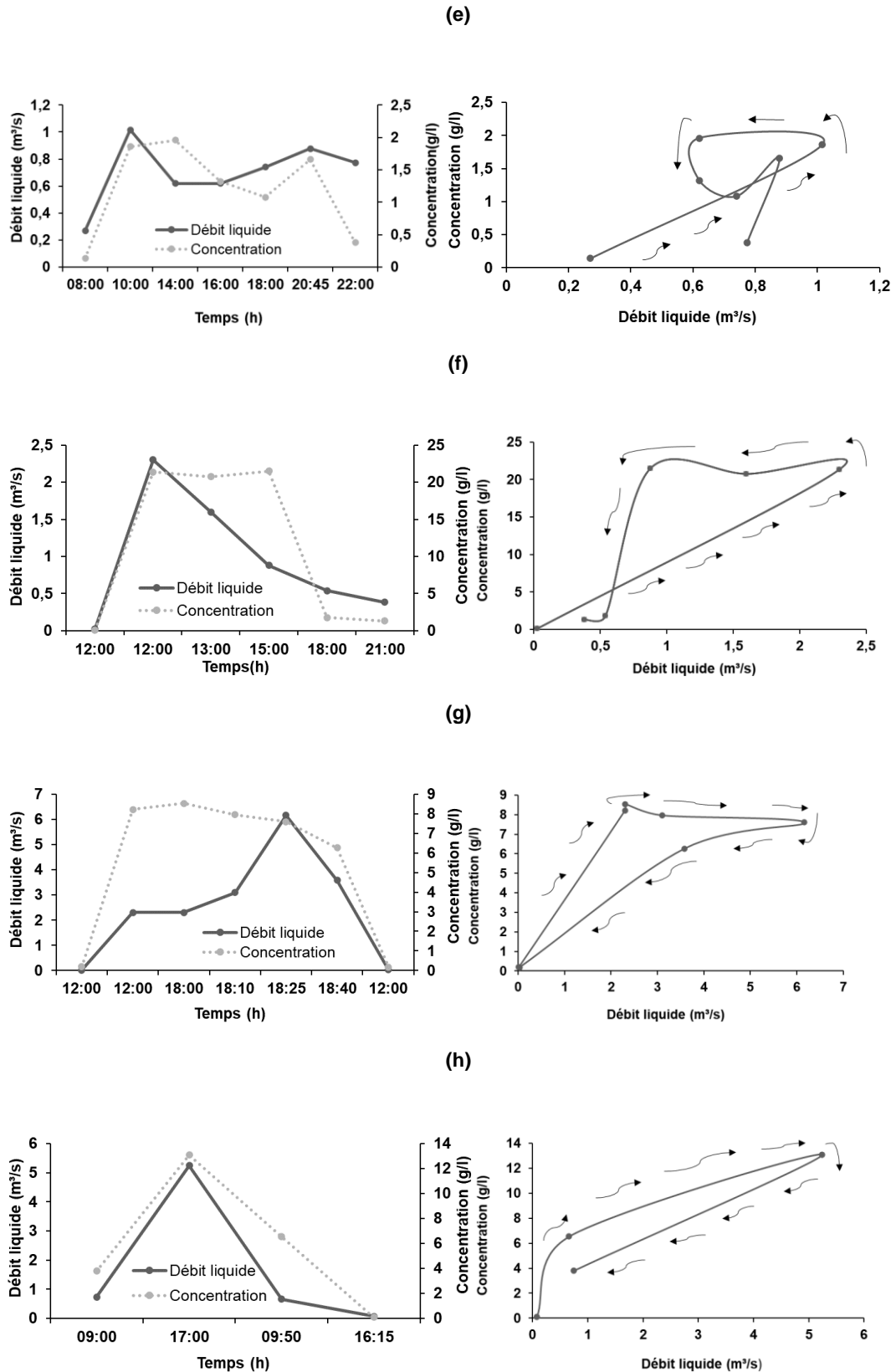


Figure VI-6-e-f-g-h Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q_L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (e-f-g-h) les crues d'automne.

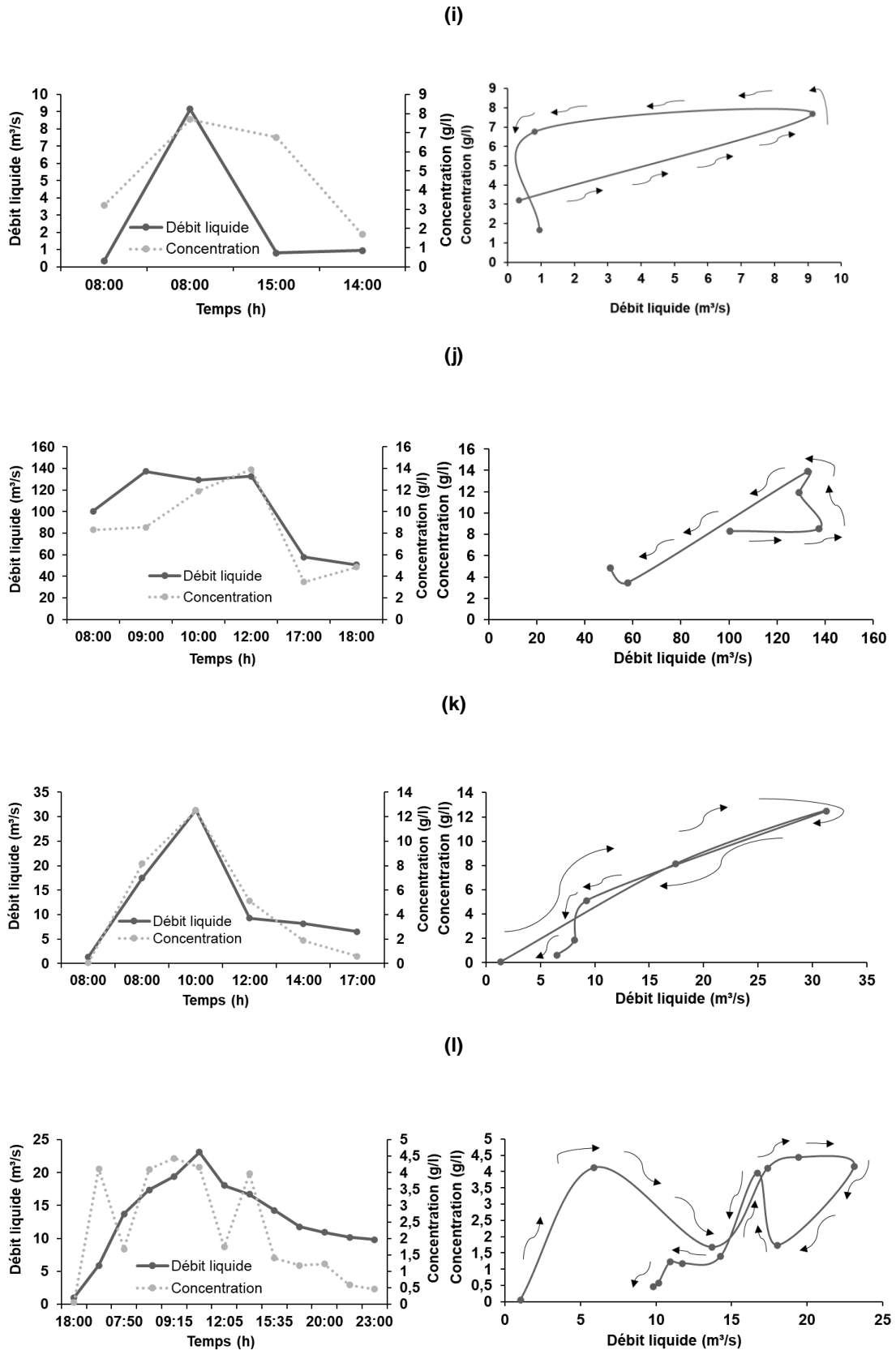


Figure VI-6-i-j-k-l Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/QL) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (i-j) les crues d'automne, (k-l) les crues d'hiver.

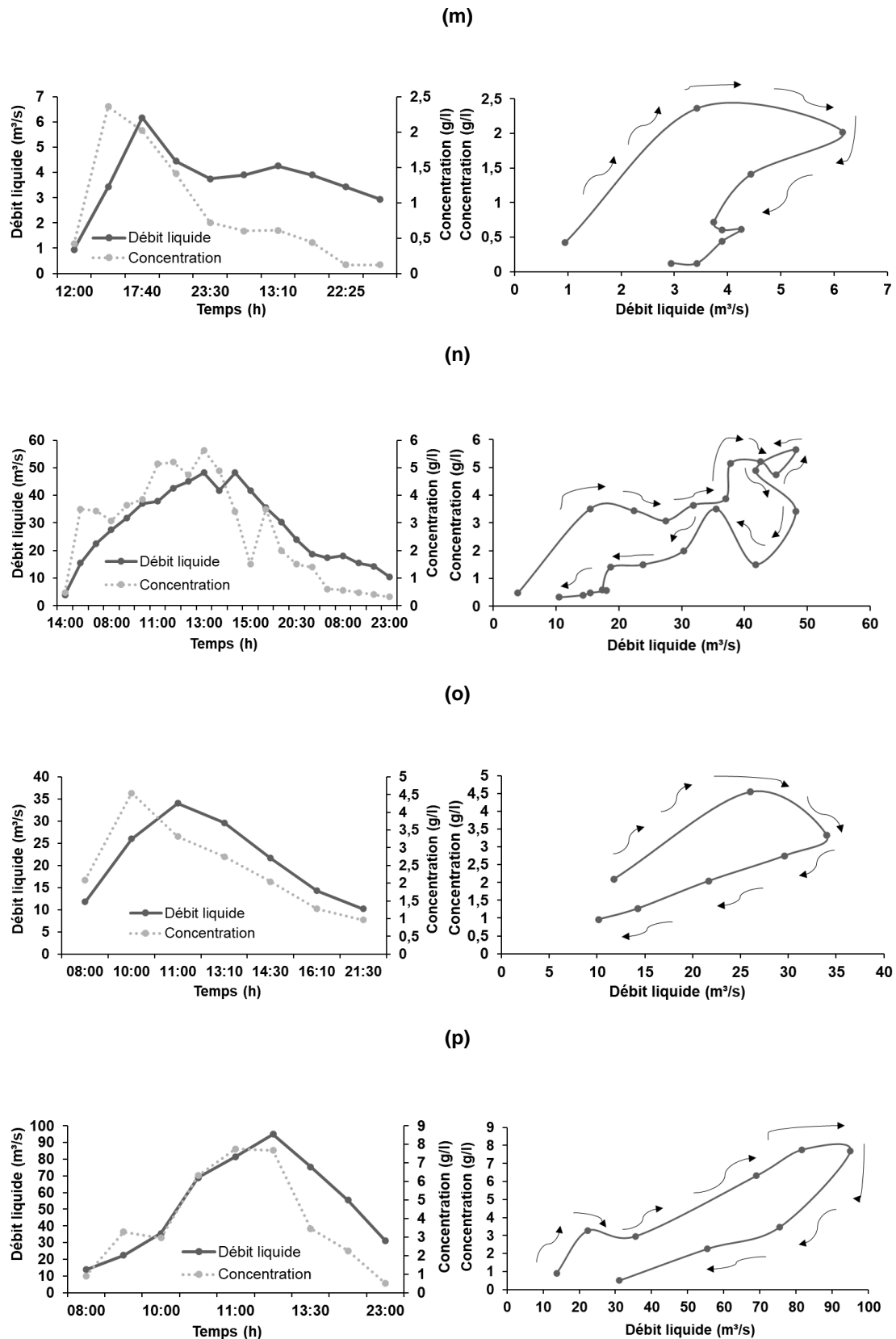


Figure VI-6-m-n-o-p Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/QL) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (m-n-o) les crues d'hiver, (p) les crues de printemps.

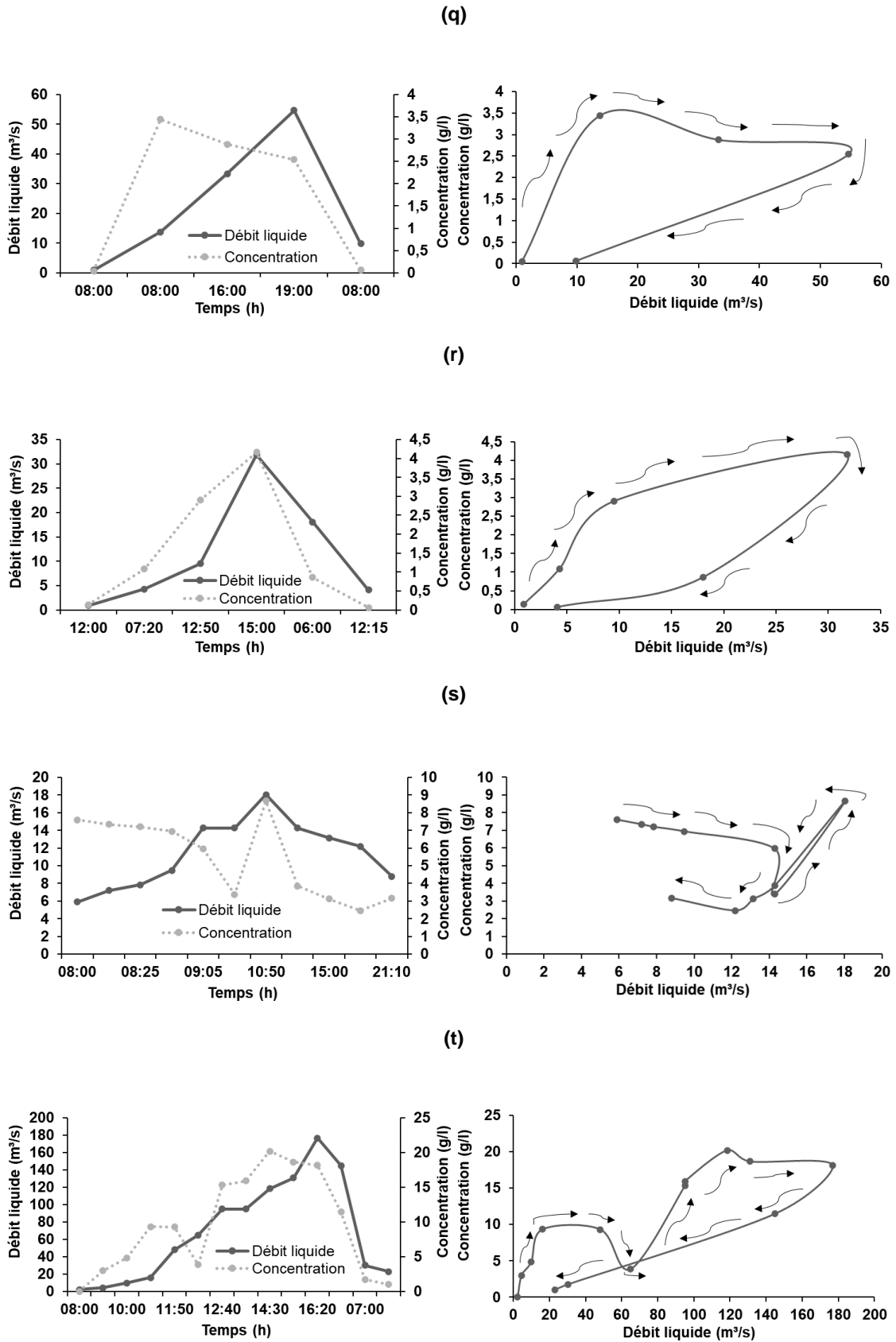


Figure VI-6-q-r-s-t Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations (C/Q_L) du bassin versant Oued Lakhdar (1970-2021), (q-r-s-t) les crues de printemps.

Le diagnostic des figures (figure VI-6-a-b-c-d-e-f-g-h-i-j) ; (figure VI-6- k-l-m-n-o) et (figure VI-6-p-q-r-s-t) montre qu'à l'Oued Lakhdar, l'évolution des concentrations en fonction des débits suit trois modèles, les modèles de type horaire et anti-horaire sont caractéristiques des crues de la saison d'automne et le modèle de type horaire et sous forme huit est caractéristique des crues de la saison d'hiver et la saison de printemps (Tableau VI-4).

Tableau VI-4 Typologie des crues basées sur le rapport C/QL (classification de *Williams, 1989*).

	Crues	Saisons	Classification	Formes
Figure VI-6-a	09/11/1971	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-b	06-07/09/1976	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-c	10-13/11/1984	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-d	03-04/09/1986	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-e	18/11/1986	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-f	08/10/1987	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-g	02-06/10/1995	Automne	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-h	23-31/10/2000	Automne	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-i	04-06/11/2008	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-j	13/11/2012	Automne	Classe III	Sens anti-horaire
Figure VI-6-k	11-12/01/1970	Hiver	Classe V	Forme huit
Figure VI-6-L	08-09/02/1986	Hiver	Classe V	Forme huit
Figure VI-6-m	03-06/02/1987	Hiver	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-n	12-14/02/1987	Hiver	Classe V	Forme huit
Figure VI-6-o	22/02/1987	Hiver	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-p	30/03/1974	Printemps	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-q	20-24/04/1975	Printemps	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-r	03-08/03/1980	Printemps	Classe II	Sens horaire
Figure VI-6-s	02/03/1991	Printemps	Classe V	Forme huit
Figure VI-6-t	14-15/03/1991	Printemps	Classe V	Forme huit

La relation de type horaire, indique que la source de sédiments est à côté de l'exutoire ou dans le fond du cours d'eau. Les hystérésis de type horaire peuvent être causés par la forte intensité des pluies au début de l'orage (*Yles et al, 2017*).

Ainsi, l'augmentation du ruissellement et la faible rugosité des sols entraînent une érosion immédiate. Le pic de concentration de matières en suspension est précédé du débit liquide lors de ces crues de classe II, de type horaire (crue d'automne : 02-06/10/1995 ;23-31/10/2000, crue d'hiver : 03-06/02/1987 ; 22/02/1987, crue de printemps : 30/03/1974 ;20-24/04/1975 ;03-08/03/1980). Les crues d'automne sont caractérisées par des hystérésis de classe III qui présentent des courbes antihoraires. Il s'agit des crues du (09/11/1971), (06-07/09/1976), (10-13/11/1984), (03-04/09/1986), (18/11/1986), (08/10/1987), (04-06/11/2008) et du (13/11/2012), pour ces crues les concentrations maximales sont parmi les plus fortes.

Les hystérésis de type horaire et antihoraire sont regroupées sous la forme en huit ([Williams, 1989](#)). Selon [Yes et al \(2017\)](#), cela correspondrait à une augmentation des débits liquides et solides dès le début de la crue. Les crues du (11-12/01/1970), (08-09/02/1986), (12-14/02/1987), (02/03/1991), (14-15/03/1991) sont marquées par la forme en huit. Ces crues se distinguent par des précipitations abondantes qui tombent à la fin de la saison d'hiver et au début de la saison de printemps, alors que le sol est saturé en eau, ce qui entraîne le ruissellement local et le transport des sédiments en suspension.

Pour comparer nos résultats avec d'autres recherches scientifiques similaires sur les crues extrêmes ont été menées à l'échelle nationale notamment : ([Ketrouci et al,2012](#) ; [Sadeuk Ben Abbes et al ,2020](#) ; [Boutaghane et al,2021](#)). A l'échelle régionale on cite les travaux de [Millares et ses al \(2020\)](#), il a été prouvé que 1,58. 10⁶ t de sédiments sont éjectées lors de 84 épisodes pluvieux, ce qui représente 23,7 % de la valeur estimée pour toute la période d'étude, avec une durée de 1 à 4 jours. L'étude prene en considération les 10 épisodes quotidiens les plus importants, 6 en période humide et 4 en période sèche, leur masse totale représente 34,6 % des apports pendant la période d'intervention.

Conclusion

Sur une période de 52 ans, il a été examiné 33 crues externes les plus remarquables dans la région d'Oued Lakhdar. Il a été observé que les crues de printemps présentent un risque d'inondation plus élevé que les crues d'été et d'hiver, que ce soit pour les villes ou les infrastructures hydrauliques telles que le transport solide et l'envasement des barrages. Les 18 crues de printemps, qui constituent 54% des crues sur une période de 52 ans, sont les plus importantes, avec des débits élevés et des hauteurs d'eau pouvant atteindre des valeurs maximales successives de 138 m³.s⁻¹ et 2,5 m, enregistrées le 29 mars 1973. En revanche, les 6 crues d'automne, qui représentent 18 % des crues totales, peuvent atteindre des valeurs maximales de 2,48 m pour le débit d'eau et 138,2 m³.s⁻¹ pour le débit. De plus, les 9 crues hivernales et les 3 crues estivales, qui représentent respectivement 27 % et 9 % du total des crues, ne présentent aucune tendance significative, à l'exception de la crue hivernale enregistrée les 25, 26 janvier 2013, avec un débit de 37,8 m³.s⁻¹ et une profondeur d'eau de 1,31 m.

Finalement, il a été étudié la typologie des crues dans la zone d'étude consistant à mettre les hystérésis dans les relations (C/Q_L) . On a étudié les 20 crues enregistrées dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar en utilisant les graphes représentant C en fonction de Q_L . Ces graphes représentent trois modèles de courbes d'hystérésis : dans le sens horaire, antihoraire et en forme de huit. Parmi les 20 crues examinées, celles qui ont une boucle dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et qui sont huit pour la relation (C/Q_L) sont caractérisées par des concentrations maximales et des flux généralement élevés.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans les bassins versants, la fabrication et le déplacement des particules solides sont complexes et étroitement liés à l'intensité des pluies, à la forme du bassin versant et aux paramètres hydrauliques du cours d'eau. Au fur et à mesure des résultats analysés, nous avons exposé quelques conclusions concrètes concernant les diverses études cartographiques et traitements statistiques effectués, ainsi que l'intérêt de ce travail dans la région.

Grâce à cette étude sur le transport des particules solides dans la région de l'Oued Lakhdar, on a pu élaborer une vision globale de la question. Effectivement, notre approche a été organisée en analysant le climat de la zone d'étude et l'impact de la sécheresse sur le transport solide. Il a été étudié les phénomènes extrêmes dans le contexte des changements climatiques. On a établi une carte illustrant les zones à forte sensibilité à l'érosion. Il a été analysé les données de concentrations en MES collectées par l'ANRH. On a étudié les processus hydrologiques dans la région d'étude et modélisé les flux de MES et analysé les épisodes de crues.

L'analyse du climat et de la sécheresse, ainsi que de leurs conséquences sur le transport solide, a révélé une alternance de périodes sèches et humides. Les caractéristiques de la sécheresse à long terme ont été évaluées à l'aide de trois indices de sécheresse : l'indice de précipitations standardisé (SPI-12 mois), l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI-12 mois) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI-12 mois). Selon les résultats, les trois indices présentent des différences dans leur capacité à évaluer la gravité de la sécheresse. Plus précisément, la forte augmentation de la température constatée pendant la période d'étude a provoqué une disparité significative entre les valeurs du SPI et du SPEI. Le SPEI, qui combine les données de température et de précipitations, semble plus apte à repérer les événements de sécheresse associés à l'élévation des températures que le SPI, qui se contente des précipitations. En outre, les indicateurs de sécheresse SPI et SPEI montrent que les années humides ont été 1972, 1978, 1997, 1998, 2009, 2010, 2013 et 2014, tandis que les années sèches ont été 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 1990, 1995, 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2020 et 2021.

La carte de zone sensible à la dégradation des terres fournit plusieurs informations sur la gravité de sédimentation. L'étude de RUSLE sur la dégradation des terres en nappe dans la région d'étude a révélé une valeur de $8,43 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, ce qui dépasse le seuil des dégradations des terres linéaire évalué à $0,74 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, en se basant sur les valeurs des concentrations réalisées par l'ANRH. Malgré le fait que la validité des pertes en sols de RUSLE soit discutable, la méthode offre une aide significative aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution de la région et planifier les actions de lutte contre l'érosion. De cette façon, elle peut par exemple permettre de surveiller l'effet de l'utilisation des sols et des implantations.

Il a été étudié le transport des particules solides dans la zone d'étude en utilisant des valeurs obtenues de la station de Chouly (1970-2021). L'utilisation de la formule puissance nous a permis d'estimer le

transport des particules solides à différents échelles temporelles. Les débits des matières solides diffèrent des débits liquides en utilisant $Q_s = 0,3566Q_L^{1,4946}$. Il a été démontré que le transport des particules solides dans la région d'étude se font principalement pendant la saison d'automne (66 %), nettement moins en hiver (16 %), au printemps (15 %) et presque nuls en été (3 %) par rapport à l'apport annuel moyen des particules solides enregistré à l'exutoire de la zone d'étude évalué à 12 619 (t), cela équivaut à une dégradation spécifique moyenne de $74 \text{ t. km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Cette valeur semble être raisonnable par rapport à celles observées dans les autres bassins versants à climat semi-aride. On a observé une variation annuelle des apports solides qui varie selon les périodes humides et sèches. L'Oued transporte des volumes de sédiments qui diffèrent pendant la période d'étude. Par exemple, sur deux années consécutives, elles varient entre $11\,685 \text{ t.an}^{-1}$ pour l'année 2007-2008, soit une dégradation spécifique de $68,73 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, et $16\,294 \text{ t.an}^{-1}$ pour l'année 2008-2009, soit une dégradation spécifique de $95,85 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Il a été examiné 33 crues externes les plus significatives (6 à l'automne, 9 à l'hiver, 18 au printemps et 3 à l'été) et nous observons que les crues de printemps présentent un risque d'inondation plus élevé que les crues d'été et d'hiver, que ce soit en ce qui concerne les villes ou les infrastructures hydrauliques telles que le transport solide et l'envasement des barrages. Les 18 crues de printemps, qui représentent 54% des crues sur une période de 52 ans, sont les plus marquantes, avec des débits élevés et des hauteurs d'eau pouvant atteindre des valeurs maximales successives de $138 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et 2,5 m, enregistrées le 29 mars 1973. En revanche, les 6 crues d'automne, qui représentent 18 % des crues totales, peuvent atteindre des valeurs maximales de 2,48 m pour le débit d'eau et $138,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour le débit. De plus, les 9 crues hivernales et les 3 crues estivales, qui représentent respectivement 27 % et 9 % du total des crues, ne présentent aucune tendance significative, à l'exception de la crue hivernale enregistrée les 25, 26 janvier 2013, avec un débit de $37,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et une profondeur d'eau de 1,31 m. Ensuite, notre analyse de la typologie des crues dans le bassin vise à mettre en lumière le phénomène d'hystérésis dans les relations (C/Q_L). On analyse les crues enregistrées dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar en utilisant les graphes représentant C en fonction de Q_L, ce qui permet de générer trois modèles de courbes d'hystérésis qui peuvent être entendues dans le sens horaire, antihoraire et sous forme de huit. Parmi les crues étudiées, celles qui présentent une boucle dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et qui sont huit pour la relation (C/Q_L) témoignent de concentrations maximales et de flux généralement élevés. D'un autre côté, les limites de l'étude peuvent affecter les résultats, on cite à titre d'exemple :

- Les données de deux stations différentes ont été utilisées pour calculer l'indice de sécheresse SPEI car la station de mesure des précipitations n'a pas de capteur de mesure de température et la station de mesure de température n'a pas non plus de capteur de mesure de précipitations ;
- La question d'environ 400 mètres de dénivelé entre les deux stations n'a pas pu être résolue ;
- Les précipitations et la température moyenne dans le bassin ont été estimées en considérant les précipitations à la station de Chouly comme les précipitations moyennes dans le bassin et la température à la station de Mefrouche comme la température moyenne dans le bassin ;

- Dans la zone étudiée, il n'existe aucune station météorologique. Deux stations ont été utilisées, l'une à l'extrémité du bassin versant et l'autre à proximité de la zone étudiée ;
- Il est important de noter que les données manquantes telles que l'humidité, le vent et l'intensité maximale des précipitations sur une fréquence de 30 minutes (I30) peuvent avoir un impact sur les résultats ;
- Il est important de noter que les résultats des analyses spatiales présentées dans cette étude présentent des limites et des imperfections. En premier lieu, la version révisée de l'équation universelle de perte en sol (RUSLE) offre une estimation de la perte en sol prévue à long terme. Elle ne prédit que l'érosion en nappe et en rigoles, sans prendre en compte le ravinement et les dépôts. Seule l'érosion grossière est prédite. En plus de cela, il y a également les incertitudes liées aux diverses sources de données et aux modèles utilisés pour évaluer divers facteurs.

Afin de pallier ces lacunes, les recherches à venir peuvent examiner les phénomènes extrêmes tel que la sécheresse et les crues dans le contexte de changement climatique, ainsi que leur impact sur l'érosion et transport solides :

- En utilisant une méthode d'interpolation pour rassembler plusieurs stations météorologiques autour du bassin versant ;
- En peut ajouter d'autres indices de sécheresses pour enrichir cette modeste recherche ;
- Il est conseillé de conclure un accord avec les services de l'ANRH afin de faciliter l'accès aux données hydro climatiques ;
- Afin d'optimiser les formules des matières en suspension et de mieux comprendre le déplacement des matières en suspension dans les Oueds, il est primordial d'allonger la durée de mesure des concentrations ;
- Il serait bénéfique d'examiner les changements des états de surface, on se basant sur des séries d'images satellitaires et de procéder à une classification multi-dates ;
- Il serait également intéressant d'effectuer une analyse spectrale à l'aide d'un radiomètre de terrain qui prend en compte la réponse spectrale du sol ;
- L'utilisation du modèle RUSLE serait plus judicieuse pour les bassins versants de petites superficies, car cela facilitera l'acquisition de données d'entrée et permettra une compréhension plus facile de l'hydrologie des petits bassins versants par rapport à celle des grands bassins versants ;
- En peut ajouter d'autres méthode de cartographie d'érosion, par exemple les modèles SWAT ; MUSLE et les comparé avec nos résultats.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdelkader B., Khalladi M., & abdelkader K.(2011). *Envasement du barrage de bouhanifia (Algérie). Méthode hauteur-capacité et hauteur-superficie.* tsm 11 2011 - page(s) 35-40. <https://doi.org/10.1051/tsm/201111035>.

Achbah, M., Khattabi A, Pruneau D, & Boumeaza T.(2024). *Évaluation de la vulnérabilité des communautés de montagne face au changement climatique. Région Beni-Mellal-Khénifra, Maroc , Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement ,* <https://doi.org/10.4000/12pp9>

Achite M., & Meddi M. (2004). *Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (nord-ouest algérien).* Sécheresse ; 15(4) : 367-73.

Achite M., & Meddi M. (2005). *Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. cas du bassin versant de l'oued mina (nord-ouest algérien).* Revue des sciences de l'eau ; 18 special : 37-56.

Achite M., & Ouillon S. (2007). *Transport de sédiments en suspension dans un bassin versant semi-aride, oued Abd, Algérie (1973-1995).* Revue d'hydrologie ; 343(3) : 187-202.

Achite M, & Ouillon S.(2016). *Évolutions récentes du climat, de l'hydrologie et de la charge sédimentaire dans l'oued Abd, Algérie (1970-2010).* Hydrologie et sciences du système terrestre, 2016, 20, pp. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1355-2016>.

Achir M.(2016). *Étude de l'impact des changements climatiques sur la dynamique de l'alfa (stipa tenacissima L.) dans la région steppique de Tiaret (Algérie occidentale).* Thèse de doctorat en sciences. Université Djilali Liabes de sidi bel Abbès.

Aissa Mamoune.S.M, (2002). *Contribution a la mesure, prévision et modélisation du comportement des sols expansifs.* Mémoire de magister Université Abou bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie (PDF) STABILISATION DES SOLS GONFLANTS. Available from: https://www.researchgate.net/publication/284993257_STABILISATION_DES_SOLS_GONFLANTS

Aissaoui c., & Ben ghazi A. (2023). *Quantification de l'érosion hydrique en nappe dans la moyenne vallée de l'oued Sarrath (haut-tell, Tunisie), vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement.* <https://doi.org/10.4000/vertigo.40615>.

Aiguo D (2011) *Caractéristiques et tendances des différentes formes de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer entre 1900 et 2008.* J Geophys Res Atmos 116(D12115):1–26. <https://doi.org/10.1029/2010J D015541>

Aleksova B ., Milevski I., Dragicevic S ., & Lukic T.(2024). *Évaluation intégrée de la vulnérabilité multirisque basée sur le SIG dans la municipalité de Makedonska Kamenica, Macédoine du Nord.*2024, 15, 774. <https://doi.org/10.3390/atmos15070774>.

- Analy M, & Laftouhi N.E (2021) *Épuisement des eaux souterraines en milieu urbain sous climat semi-aride et sécheresse persistante. Ville de Marrakech (Maroc). Water 13(22):3253.* <https://doi.org/10.3390/w13223253>
- ANBT.(2021). (Agence nationale des barrages et transferts). *Le tableau de (ANBT) communiqué par le ministère des Ressources en eau et de la Sécurité hydrique.*
- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N. & Hrissanthou V.(2012). *Calcul de l'indice de sécheresse (SPI) avec fonctions de distribution alternatives. Water Resour Manage 26, 2453–2473 (2012).* <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>
- Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K. & Weesies, G.A., (2003). *Prévision de l'érosion des sols par RUSLE pour les conditions des hautes terres du centre du Kenya. Agriculture, Ecosystems and Environment, 97, pp. 295-308*
- Aouachria M.(2023). *Les signes de l'érosion hydrique à travers les sous bassins versants d'oued El Arab : causes et effets sur le barrage de Babar. Thèse de doctorat en sciences spécialité hydraulique, université Mohamed Khider Biskra.*
- AQUASTAT (2017). *Système d'information mondial de la FAO sur l'eau et l'agriculture.*
- Arabi M., & Roose E. (1991). *Influence du système de production et du sol sur le ruissellement dans la station Ouzera, Algérie. Bulletin réseau érosion n° 9, orstom. pp :123 – 129.*
- Arabi M. (2021). *La lutte contre l'érosion en Algérie : de la défense et restauration des sols (DRS) à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Revue marocaine des sciences agronomiques et vétérinaires, 01/12/2021, vol. 9, n. 4, p. 657-665.* https://www.agrimaroc.org/index.php/actes_javh2/article/view/1051.
- Arbaoui. (2018). *Thèse doctorat. École nationale supérieure d'hydraulique. Caractérisation, variabilité et prévision de la sécheresse dans le Nord-est Algérien.*
- Aserar N., Moussadak R., & Douira A. (2019). *Etude quantitative de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de Ben Ahmed (centre du Maroc). rev. mar. sci. agron. vét., 7(2), 385–389.*
- Auclair D., & Biehler J. (1967). *Etudes géologiques des Hautes Plaines Oranaises entre Tlemcen et Saïda. Publ. Serv. Géol. Algérie. Ann. Ser. n° 34, pp. 3 - 45., 8 fig.*
- Aziz, H., Boughani, M. & Salamani, M.(2007). *Évolution de la pluviométrie dans quelques stations arides algériennes, Sécheresse, vol. 18. 4.314-20.*
- Bakreti A., Braud I., Leblois E, & Benali A.(2013). *Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie occidentale). Revue des sciences hydrologiques, 2013, 58 (1), pp.133-151. https://doi.org/10.1080/02626667.2012.745080.*

- Balbo F, Wulandari RA, Nugraha MRR, Dwiandani A, Syahputra R, & Suwarman R (2019) Évaluation des indices de sécheresse, indice de précipitation standard, indice d'évapotranspiration standard et indice de gravité de la sécheresse de Palmer à Cilacap, Java central. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 303(1):012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012012>
- Balla, F (2019) Modélisation des flux hydro-sédimentaires et cartographie des zones à risques d'érosion hydrique dans certains bassins versants des hauts plateaux constantinois. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2.
- Baloul D, Ghenin A.N, & Megnounif A.(2023). Estimation de la concentration sédimentaire par la méthode de la courbe de notation sédimentaire dans le bassin versant de l'Isser (nord-ouest de l'Algérie). *Ecological Engineering & Environmental Technology* 2023, 24(6), 282–291 <https://doi.org/10.12912/27197050/169308>
- Baloul D, Ghenin A.N, & Megnounif A.(2025). Comportement du Q-SSC lors des crues dans le bassin versant de l'Isser (nord-ouest de l'Algérie). *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 34, No. 1 (2025), 21-28. <https://doi.org/10.15244/pjoes/185705>
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., & Palutikof J.P. (2008). *Changement climatique et eau. Document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève.*
- Beck S., & Mahony M.(2018). *Le GIEC et la nouvelle carte de la science et de la politique.les fils du changement climatique. Volume9, issue 6.* <https://doi.org/10.1002/wcc.547>.
- Beguería S, Vicente-Serrano SM, Reig F, & Latorre B (2014) Indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI) revisité : ajustement des paramètres, modèles d'évapotranspiration, outils, ensembles de données et surveillance de la sécheresse. *Int J Climatol* 34(10) : 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/JOC.3887>
- Belabbaci. Z. (2014). *Stabilisation des sols gonflants. Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. Département Génie civil.*
- Belarbi H., Touaibia B., Boumechra N., Amiar s., & Baghli N. (2016). Sécheresse et modification de la relation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued sebdou (algérie occidentale). *Revue des sciences hydrologiques*, 62(1), 124–136. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1112394>.
- Belagoune F.(2020). *Étude hydrologique des bassins versants aride et semi-aride du sud-est de l'Algérie (cas des bassins : Chott Melghir, Chott d'El Hodna et hauts plateaux constantinois). Thèse de doctorat en sciences filière : génie civil. Université Kasdi-Merbah Ouargla.*
- Belalite H, Menani M.R, & Athamena A. (2022). Calcul des besoins en eau des principales cultures et des ressources en eau disponibles en climat semi-aride, cas de la plaine de Zana-Gadaïne, Nord-Est algérien. *Revue algérienne des sciences et technologies de l'environnement, édition de juin.* Vol. 8. No 2. (2022) ISSN : 2437-1114.

- Belloum A. (1993). *Hydrologie agricole en Algérie—une double problématique*. *Hydrological Sciences Journal*, 38 (6), 479–495. <https://doi.org/10.1080/02626669309492700>.
- Belarbi F.(2018). *Etude des précipitations, du transport solide dans le bassin versant de la Tafna et leur interrelation*. Thèse doctorat. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14106.26565>.
- Benaïcha A.C, Fourar A, & Mansouri T. (2021). *Contribution à l'étude de valorisation des sédiments extraits du barrage de Koudiat Medouar dans les travaux de construction*. Séminaire international sur l'ingénierie de la construction des villes (architecture, génie civil, hydraulique, travaux publics, urbanisme).
- Ben Cheikha I., Mabrouk El Asmi A., Gdiri A., Oueslati M., Attia R., Ben Rhouma A., Aouadi T., Jaoued M., & Gueddari M.(2023). *Évaluation des taux d'érosion des sols via la modélisation 137cs et Rusle dans le bassin versant de Sigilil (nord-est de la Tunisie)*. *géoderme régionale* .volume 35. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00714>.
- Benchetrit M. (1972). *L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie*. ed. presses universitaires de france, paris, 216 p.
- Beneddine .L (2012). *Modélisation du fonctionnement hydrologique et des processus d'érosion et de transport des sédiments dans le bassin de la Tafna*. Mémoire de Magister.184p. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- Bendjema L, Baba-hamed K, & Bouanani A (2019) *Caractérisation des indices de sécheresse climatique appliqués au bassin versant du Mellah, Nord-Est algérien*. *J Water Land Dev*. 43(1):28–40. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0060>
- Bendjoudi, H., & Hubert, P. (2002). *Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants*. *Hydrological Sciences Journal*, 47(6), 921–930. <https://doi.org/10.1080/02626660209493000>
- Benest M. (1985). *Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire*. *Docum. Lab. Géol. Lyon*, n° 95, 581 p., 145 fig., 23 pl.
- Benest M., Bensalah M., Bouabdellah H & Ouardas T. (1999). *La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemcénien (Avant-Pays Tellien d'Algérie Occidentale)*. *Stratigraphie, paléoenvironnements, dynamique sédimentaires et tectogenèse alpine*. *Bull. Serv. Géol. Algérie*, Vol. 10, n° 2, pp. 127-157, 7 fig.
- Ben Ghazi A., & Khmissi I. (2019). *Essai de quantification et spatialisation de la perte en sols dans le bassin-versant de l'oued El Kébir (haut-tell tunisien)*, *Revue internationale des sciences humaines et des études culturelles*, 6, 3, pp. 25-49.

Ben Jalleb .O , Jaballi .R, Ben Ouezdou. H, & Aouadi N.(2024). *Impacts De L'érosion Hydrique Sur Les Sites Archéologiques En Tunisie Centre-ouest : Le Cas Des Occupations Archéologiques De L'oued Bou Hayya*. *Journal d'Hérodote des sciences humaines et sociales*. Vol.8(1), pp 476-492.

Benkelfat K. (2020). *Les ripisylves de la région de Tlemcen, cas des groupements à Tamarix* Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre et de l'univers.

Benkhaled A., & Remini B. (2003). *Analyse de la relation de puissance : débit solide - débit liquide a l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane (Algérie)*. *Revue des sciences de l'eau* ; 16(3) : 333-56.

Benoit. G, (2024). *Eau, sol et agriculture : un trio si fragile ? Chapitre d'ouvrage.Déméter*.pp.195-220.

Ben Rhouma A., Hermassi T. , & Bouajila K.(2018). *Modélisation de l'érosion hydrique par la méthode qualitative pap/car : cas du bassin versant de Sbahia, Zaghouan*. *journal des nouvelles sciences, de l'agriculture et de la biotechnologie*, 51 (11), 3225-3236.

Benrhouma .A, Hermassi.T, Jarray.F, Bouajila.K, Mechri.M, Aouissi.J, Kotti.M.L, Attia.R, Hashem.A, & Avila-Quezada.G.D.(2024). *Évaluation de l'érosion des sols à l'aide de SWAT, en relation avec l'utilisation des terres, les pratiques agricoles et les changements climatiques futurs dans un bassin versant semi-aride en Tunisie*. *Communications sur la recherche environnementale*, volume 6, numéro 10. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad85c8>

Bensaoula F.(2007). *Etude de la karstification à partir des données de forages : le cas des Monts de Tlemcen (Algérie)*. *Karstologia* Année 2007 49 pp. 15-24.

Bensaoula F., & Adjim M. (2008). *La mobilisation des ressources en eau : contexte climatique et contraintes socio-économiques (Cas de la Wilaya de Tlemcen)*. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 79-92.

Bensekhria, A., & Bouhata, R. (2022). *Évaluation et cartographie de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'approche RUSLE et des outils SIG : cas du bassin versant de l'Oued el-Haï, Aurès Ouest, Nord-Est algérien*. *Revue internationale de géo-information de l'ISPRS*, 11(2), 84. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020084>

Benselama O.(2019). *Étude de processus d'érosion dans le bassin versant de l'oued El Maleh d'Ain Temouchent et l'analyse de facteur de risque*. Thèse de doctorat en sciences spécialité hydraulique, université Belhadj Bouchaib Ain Temouchent.

Benzater, B., Elouissi, A., Dabanli, I., Harkat, S., & Hamimed, A. (2021). *New approach to detect trends in extreme rain categories by the ITA method in northwest Algeria*. *Hydrological Sciences Journal*, 66(16), 2298–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1990931>

Berhail S, & Katipoğlu OM (2023) *Comparaison du SPI et du SPEI comme outils d'évaluation de la sécheresse en région semi-aride : cas du bassin de l'oued Mekerra (nord-ouest de l'Algérie)*. *Theor Appl Climatol*.154(3):1373–1393. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04601-2>

- Bertola, (2003). Sécheresse : la désertification est-elle une fatalité ? *Hydrological Sciences Journal*, juin 2003.
- Bessaklia, (2021). Contribution à l'étude de l'évolution de la pluviométrie en Algérie. Cas de l'extrême est algérien. Thèse doctorat. Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – Faculté de Technologie. Spécialité : Science de l'eau.
- Bessaoud O., (2006), La stratégie de développement rural en Algérie. *Options Méditerranéennes*, serA/N°71 ; 79-89.
- Bezak N., Borrelli p., Mikoš M., Auflič M.J., & Panagos P.(2024). Vers une modélisation multi-modèle de l'érosion des sols : une évaluation de la méthode du potentiel d'érosion (epm) pour les évaluations globales de l'érosion des sols. volume 234, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107596>.
- Bkhairi A. (2012). Suffusion et érosion hydrique en milieux semi-arides ; le cas des hautes steppes tunisiennes. *Revue de physio-géographie physique et environnement*, 6, 1-22. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2246>
- Boardman J., & Poesen J. (2006). Érosion des sols en Europe : principaux processus, causes et conséquences. Dans *érosion des sols en Europe* (eds j. boardman and j. poesen), john wiley & sons, ltd, chichester, uk.
- Bolton, P., Bradbury, P.A., Lawrence, P. & Atkinson, E. (1995) CALSITE Version 3.1. Simulation calibrée de l'érosion transportée. Manuel d'utilisation. Wallingford, Royaume-Uni, HR Wallingford Ltd.
- Borrelli P., Van Oost K., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., & Panagos P.(2018). Une étape vers une évaluation holistique de la dégradation des sols en Europe : coupler l'érosion sur site avec le transfert de sédiments et les flux de carbone. *Recherche environnementale*. volume 161, pages 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.009>.
- Bouabdellah, G. (2022) Estimation du débit des rivières en dehors du régime d'écoulement uniforme, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 66(3), pp. 197–206, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPme.18945>
- Bouanani A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation. Étude de quelques sous-bassins de la Tafna (N-W-Algérie). Thèse. Université de Tlemcen (Algérie), 244 p.
- Bouanani A., Baba-Hamed K., & Fandi W. (2013). Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna- nord-ouest Algérie). *Revue des sciences de l'eau* ; 26(2) : 119-132. <https://doi.org/10.7202/1016063ar>.
- Bouchelkia H. (2009). Étude du transport solide dans un bassin versant et son impact sur l'envasement des barrages (Cas du bassin versant de Chélif) .Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen (Algérie), 165 p.

Bouderbala D., Souidi Z., Kattar S., Lourenço I., & Nunes A. (2019). Variabilité des précipitations et érosivité des sols dans les régions semi-arides : cas de la région ouest algérienne. *Revue brésilienne de climatologie*, 24. <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.58277>.

Boudiaf, B., Dabanli, I., Boutaghane, H. & Şen .Z.(2020). Évaluation des risques de température et de précipitations sous l'effet du changement climatique dans le nord-est de l'Algérie. *Earth Syst Environ* 4, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00136-7>

Boudjemline F., Matari O., Faci M., & Farhi Y.(2016). Cas des vagues de chaleur sur l'Algérie en 2009 et 2012. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. *Journal algérien des régions arides (JARA)*. Numéro spécial, canicule.2016.

Boughalem .M (2013). *Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols à l'érosion ; cas du bassin versant de l'Isser- Tlemcen (Algérie)*. Thèse de Doctorat en foresterie. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/20100>

Boughalem .M, Ienciu .A.A , Toure .A.O , Meghraoui .M , Regagba .M , Souidi. Z , & Hamimed .H.(2020). Étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région de Tlemcen, Algérie. *Geo-Eco-Trop.*, 2020, 44(4) : 595-607

Bouguerra S., Bouanani A., & Baba-Hamed K. (2016). Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). *revue des sciences de l'eau / journal of water science* . Volume 29, numéro 3, 2016, p. 179–195. <https://doi.org/10.7202/1038923ar>.

Bouguerra.S.A & Bouanani A. (2019). Analyse saisonnière et interannuelle de la dynamique des flux en suspension dans le bassin versant de l'oued Boukiou (nord-ouest de l'Algérie), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.13189>

Bouhadeb C.(2019). Évaluation du transport solide au niveau du bassin versant d'oued Bounamoussa et ses incidences sur l'envasement du barrage de Cheffia (nord-est algérien). Thèse de doctorat L.M.D en hydraulique option : hydraulique. Université de Batna 2.

Boukheir R., Cerdo O., & Abdallah C. (2006). Cartographie régionale des risques d'érosion des sols au Liban. *Revue de géomorphologie*. vol. 82. iss. 3 p. 347–359.

Bouklikha A ,Habi M, Elouissi A, Benzater B, & Hamoudi S.(2020). Analyse innovante des tendances appliquée aux précipitations annuelles et saisonnières dans le bassin versant de la Tafna (Algérie). *Journal brésilien de météorologie*, v. 35, non. 4.pp. 631-647. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540068>

Boulassel A., Mouhouche B., Smadhi D., Dakhia N., & Saidi I.(2016). Impact des canicules/sécheresse sur les productions agricoles et la demande en eau d'irrigation. *Journal algérien des régions arides (JARA)*.p 56-60. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. Numéro spécial, canicule.

Bouleknafet Z. , & Elahcene O.(2023). Quantification du transport de particules solides en suspension dans un cours d'eau : cas de l'oued Zeddine Ain-Defla, Algérie. *Journal de l'aménagement du territoire et de l'eau*. 2023, no. 56 (i–iii): 102–108. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143750>.

Boulmaiz, T., Boutaghane, H., Abida, H., Saber, M., Kantoush, S. A., & Trambly, Y. (2022). Exploration de la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le bassin transfrontalier de la Medjerda en Afrique du Nord. *Eau*, 14(3), 423. <https://doi.org/10.3390/w14030423>

Bouramdane, A.-A. (2023). Évaluation des projections multi-modèles CMIP6 dans le monde : quelles régions se réchauffent et connaissent une sécheresse en Afrique et au Maroc ? Quels changements entre CMIP5 et CMIP6 ? *Sustainability*, 15(1), 690. <https://doi.org/10.3390/su15010690>.

Bourouba, M., 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM*, 17, 345–360.

Boussalim Y., Rahine N., Badri W., Fougrach H., & Rachdi B.(2022). Modélisation de l'érosion hydrique du sol dans le bassin versant de l'oued Cherrat (Maroc) en appliquant l'équation universelle de perte de sol (USLE). *La recherche et la science aujourd'hui*. <https://doi.org/10.38173/rst.2022.24.2.15:203-222>.

Boutouga F ,(2021). Gestion intégrée des ressources en eaux dans le zab de biskra (sud-est algérien). Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar –Annaba. Faculté des sciences de la terre. Département de géologie.

Bourque A.(2000). Les changements climatiques et leurs impacts.La revue électronique en sciences de l'environnement. <https://doi.org/10.4000/vertigo.4042>.

Boutaghane, H., Boulmaiz T, Lameche E, Lefkir A, Hasbaia M, Abdelbaki C, Moulahoum A.W, Keblouti M & Bermad A. (2022). Analyse des inondations et stratégies d'atténuation en Algérie. Dans : Sumi, T., Kantoush, S.A., Saber, M. (éd.), *Crues éclair des oueds. Science des catastrophes naturelles et ingénierie de l'atténuation : rapports du DPRI*. Springer, Singapour. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_3

Bouzekri. A (2015) évaluation multicritère des situations critiques au risque de la désertification dans les Aurès (Algérie). Thèse de Doctorat. Université de Batna 2.

Breton E., (2004), *Fréquentation de loisirs et gestion des aires littorales protégées de la France de l'Ouest* Bulletin de l'association des Géographes Français, 3 - 275-287.

Budyko, M.I. (1977) *Changements climatiques*. Union géophysique américaine, Washington, D.C.

<https://doi.org/10.1029/SP010>

Casabella-González M.J., Borselli L, & García-Meza J.V.(2004). Modèle mpsiac amélioré pour l'évaluation du taux d'érosion des sols dans les zones semi-arides. *Journal des milieux arides*. volume 212, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104946>.

Camenen B, & Melun G.(2021). *Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide*. Office français de la Biodiversité.

Cerdan O., Le bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., & Souchère V.(2002). *Érosion en rigoles sur des pentes cultivées lors de deux événements pluviométriques extrêmes en Normandie, France. Recherche sur les sols et le travail du sol*. volume 67, issue 1, , pages 99-108. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(02)00045-4).

CGMS-Maroc,(2024). (Crop Growth Monitoring System – Maroc). *Le système d’alerte à la sécheresse et de prévision des rendements céréaliers au Maroc*. Balaghi R, Lahlou M, Alaouri M. Editeur : Institut National de la Recherche Agronomique – Maroc ISBN : 978-9920-787-26-0.

Chabour, N, Mebrouk, N, Hassani, I H, Upton, K, Ó Dochartaigh, B É & Bellwood-Howard, I. (2018). *Atlas de l'eau souterraine en Afrique: hydrogéologie de l'Algérie*. British Geological Survey. https://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogéologie_d'Algérie

Chebbani R, Mededjel N & Belaidi S (1995) *Application du GCES à la région de Tlemcen, Algérie*. Bull Erosion Network 15 : 489–497

Chebbani R. (1996). *Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser (Tlemcen)*. Thèse de magister INA, Alger. 135 p.

Chebbani R., Djilli K., & Roose Eric. (1999). *Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser*. In : *L'influence de l'homme sur l'érosion : 1. A l'échelle du versant*. Bulletin - Réseau Erosion, (19), p. 85-95 multigr. *L'Homme et l'Erosion : Colloque International*, Yaoundé (CMR), 1999/12/09-19.

Chebli M, Charfi S , & Dahech S.(2019). *Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019*. *Climatologie* 2020, 17, 4. <https://doi.org/10.1051/climat/202017004>.

Chen, N., Zhang, Y., Zu, J., Zhu, J., Zhang, T., Huang, K., & Chen, Y. (2020). *Effets compensatoires de la repousse post-sécheresse sur les pertes dues à la sécheresse antérieure dans les prairies du plateau tibétain*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107822. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107822>

Chemirik C.H.K. , Baahmed D. , Nedjai R. , Boudjemline D. , & Mahcer I.(2024). *Cartographie des zones de potentiel en eaux souterraines avec GIS-RS-AHP dans le cadre du changement climatique – cas du plateau de mostaganem, nord-ouest de l'Algérie*. *Ingénierie écologique et technologie environnementale*.2024, 25(6), 72–89. <https://doi.org/10.12912/27197050/186667>.

Chourghal & Boukhalifa,(2020). *Quel climat en l'Algérie vers la fin du 21ème siècle ?* Ouvrage Éditions universitaires européennes. 104p. ISBN-13 : 978-6202547741

Collignon B. (1986). *Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie)*. Thèse Doctorat., nouv. Régime, Univ. Avignon. t.1, 118p.

Collinet J., & Valentin C. (1979). Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle nouvelles perspectives. Applications agronomiques. cah.orstom, sér. pédol.17(4). pp : 283-328.

COP 15. (2022) La quinzième Conférence des parties de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification se tient à Abidjan, en Côte d'Ivoire sur le thème. Terre. Vie. Héritage : De la pénurie à la prospérité.

COP 27. (2022). (Conventions of parties) conférences de parties. La conférence de Charm El-Cheikh de 2022 sur les changements climatiques.

CRSTRA,(2010). (Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides). Atelier international sur le Risque Sécheresse, Biskra 21-22 novembre 2010. Atelier Sécheresse/ Analyse et Stratégies d'Adaptation.

CRSTRA,(2020). (Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides). La journée de lutte contre la Désertification. 2020.Biskra.

Dahmani B, Hadji F, & Allal F,(2003).Traitement des eaux du bassin hydrographique de la Tafna (N-W Algeria),Desalination,Volume 152, Issues 1–3,pp. 113-124, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01054-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01054-8).

Dahmani MN, Baba-hamed K, & Bouanani A (2024) Évaluation des conséquences de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Saïda, nord-ouest de l'Algérie. J Water Pract Technol 19(3):987–1002.<https://doi.org/10.2166/wpt.2024.058>

Danandeh MA, Rikhtehgar GA, Yaseen ZM, Sorman AU, & Abualigah L (2022) Un nouveau modèle prédictif intelligent d'apprentissage profond pour prévision météorologique des sécheresses. J Ambient Intell humanisé Calcul 14(5):1-15. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03701-7>

Debbie JD (2010) Modélisation statistique de l'indice mensuel de gravité de la sécheresse de Palmer. J Hydrologic Eng 15(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) HE. 1943-5584.00002 49](https://doi.org/10.1061/(ASCE) HE. 1943-5584.00002 49)

Deka D., Prasad Das J, Hazarika M., & Borah D.(2024). Priorisation des sous-bassins versants en fonction de l'estimation des pertes de sol à l'aide du modèle RUSLE : une étude de cas du bassin versant de Digaru, Assam, Inde. Revue internationale de recherche géospatiale appliquée (Ijagr) 15(1). <https://doi.org/10.4018/ijagr.340039>.

Demmak A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie. Thèse de doc. ing. Paris vi . 323p.

Delahaye D.(2003). Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture : analyse spatiale d'un phénomène complexe . Bulletin de l'association de géographes français, 2003 - persee.fr. 80-3 pp. 287-301.

De ploye J., Imeson A., & Oldeman I.R.(1991). *Érosion des sols, dégradation des sols et changement climatique*. Dans : brouwer f-m., thomas a-j. , chadwick m-j., éditeurs. *Changement d'utilisation des terres en Europe*, kluwer academic publisher, dordrecht, 275-292.

Derdour A, Bouarfa S, Kaid N, Baili J, Al-Bahrani M, Menni Y, & Ahmad H.(2022). *Évaluation des impacts du changement climatique sur la sécheresse dans une zone aride à l'aide d'indices de sécheresse et de données de télédétection Landsat*, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 17, 2022, Pages 1459–1469, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac123>

Derdour, A.; Abdo, H.G.; Almohamad, H.; Alodah, A.; Al Dughairi, A.A.; Ghoneim, S.S.M.; & Ali, E.(2023). *Prédiction de l'indice de qualité des eaux souterraines à l'aide de techniques de classification dans les environnements arides*. *Durabilité* 2023, 15, 9687. <https://doi.org/10.3390/su15129687>

Deroo I, Fry J.J., Lempérière F., & Nombre A.(2022). *Un nouvel âge d'or pour les barrages ?* 346(7-8):03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234603011>.

Desmet P.J., & Govers G. (1996). *Une procédure SIG pour calculer automatiquement le facteur USLE ls sur des unités de paysage topographiquement complexes*. *Journal de la conservation des sols et de l'eau*, 51, 5. pp : 427–433.

DGBGTH,(2021). (Direction générale des barrages et des grands travaux hydrauliques). *Evolution de l'envasement des barrages en Tunisie*.Buletin.2021.

Diaf A., & Ghenim A. N. (2021). *Transport solide et typologie des crues en climat semi-aride : cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (nord-ouest de l'Algérie)*. *Techniques sciences méthodes*, 3, 55–70. <https://doi.org/10.36904/tsm/202103055>.

Diaf A., Djellouli F., & Ghenim A.N. (2024). *Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le nord de l'Algérie*. *Environ earth sci* 83, 664 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11974-8>.

Diaf A., Djellouli F., & Ghenim A.N. (2024). *Impact du changement climatique sur la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Lakhdar, nord de l'Algérie*. *arab j geosci* 17, 299 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12112-1>.

Djaffar S ; & Kettab A.(2018). *La gestion de l'eau en Algérie : quelles politiques, quelles stratégies, quels avenir ?* *Revue algérienne des sciences et technologies de l'environnement*.vol. 4, n. 1. <https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/133>

Djellouli F, Bouanani A, & Baba-hamed K (2016) *Efficacité de quelques indices de sécheresse météorologique à différentes échelles de temps, étude de cas : bassin versant de l'oued Louza (NW-Algérie)*. *J Water Land Dev* 31(1):33–41. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0034>

Djellouli F, Bouanani A, & Baba-hamed K.(2019). *Caractérisation de la sécheresse et du comportement hydrologique dans le bassin versant de l'oued Louza (ouest algérien)*. *J Tech Sci Methods* 6:23–34. <https://doi.org/10.1051/tsm/201906023>

Djeziri, L. (1998). *Envasement des barrages, mobiliser le maximum des capacités*. Symbiose. v.18-21(6). p. 18-21.

Donald M , & Partners, (1997). *Etude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja, Analyse économique et effets sur l'environnement*, Atkins International Limited, BNEDER.

Douvinet J., Planchon O., Cantat O., Delahaye D., & Cador J.M.(2009). *Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des « crues rapides » dans le bassin parisien (France)*. Climatologie 6, 47-72.

Driouech F, Stafi H, Khouakhi A, Moutia S, Badi W, ElRhaz K, & Chehbouni A .(2021). *Tendances climatiques observées récemment au Maroc*. *Int J Climatol* 41:E855–E874. <https://doi.org/10.1002/joc.6734>.

Elahcene O., Terfous A., Remini B., Ghenaim A., & Poulet J.B.(2013). *Étude de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'oued Bellah (Algérie)*. *Revue des sciences hydrologiques*, 58 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.742530>.

Elahcene O., Aidoud A., Terfous A., Remini B., Jebari S., Yahiaoui K., Bendjedou Y.M., & Ghenim A.N.(2022). *Quantification du transport solide total dans un cours d'eau méditerranéen : étude de cas de l'oued Bellah, Tipaza, Algérie*. *Revue algérienne des sciences et technologies de l'environnement*.

El hafid D., & Akdim B. (2018). *Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental)*. *European Scientific Journal*. Vol.14, No.5 ISSN: 1857 – 7881.

El Mazi M., Hmamouchi M., Saber E., Bouchantouf S., & Houari A. (2022). *Effets de la déforestation sur les propriétés des sols et l'érosion : une étude de cas dans le Rif central, au Maroc*. *Société eurasiennne des sciences du sol*, 1(11), 1–9.

Elmi. S. (1972). *L'instabilité des monts de Tlemcen et de Rhar - Roubane (ouest algérien) pendant le Jurassique. Interprétation paléogéographique*. C. R. Acad. Géol. France, Paris. pp. 1521 – 152

Ennassiri B., & Mouak S. (2021). *Modélisation du risque d'érosion des sols dans le bassin versant de N'fiss : utilisation de l'équation universelle révisée des pertes en sols (RUSLE)*, *revue marocaine de géomorphologie*, 5, pp. 36-47.

El-ommal M., & Tribak A.(2023). *Comportement hydrodynamique et érosif des vertisols du bassin versant de l'oued Sra (Rif central, Maroc) – analyse des résultats de simulation des précipitations*. *Journal of ecological engineering* 2023, 24(5), 66–77. <https://doi.org/10.12911/22998993/161202>.

Elouissi A, Habi M, Benaricha B, & Boualem SA (2017). *Impact du changement climatique sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations (cas du bassin versant de Macta, Algérie)*. *Arab J Geosci* 10(22):496. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3264-x>

Faci M., Matari A., Oubadi M., Boudjemline F., & Farhi Y. (2016). Analyse des journées de forte chaleur à l'ouest algérien. *Journal algérien des régions arides (JARA)*. Numéro spécial, canicule 21-27. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides.

FAO. (2017). Sécheresse et agriculture. <http://www.fao.org/3/i7378e/i7378e.pdf>

FAO. (2023). Suivi des progrès des indicateurs des ODD liés à l'alimentation et à l'agriculture 2023. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc7088fr>

Feki H., Slimani M., & Cudennec C. (2012). Incorporation de l'altitude dans l'interpolation des précipitations en Tunisie à l'aide de méthodes géostatistiques. *Revue des sciences hydrologiques*, 57(7), 1294–1314. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.710334>.

Feki H., Slimani M., & Cudennec C. (2017). Optimisation géostatistique de l'extension d'un réseau de surveillance des précipitations : cas de la Tunisie. *Climatiquement hétérogène* (2017) 48 (2): 514–541. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.256>

Feki H., & Cudennec C. (2022). Précipitations et sécheresse : évolution de la distribution synoptique sur la Tunisie semi-aride, assemblée scientifique iaHS-aish.2022, montpellier, france, 29 may–3 jun 2022, iaHS2022-586, <https://doi.org/10.5194/iahs2022-586>, 2022.

Fistikoglu, O. & Harmancioglu, N.B., (2002). Intégration des SIG à l'USLE pour l'évaluation de l'érosion des sols. *Water Resources Management*, 16, 447–467

Fredj A., Ghernaout R., Dahmani S., & Remini B. (2024). Évaluation de l'érosion des sols grâce à la mise en œuvre du modèle RUSLE et de la technologie géospatiale dans le bassin versant de l'Isser, au nord de l'Algérie (2024) 24 (7): 2487–2505. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.154>.

Ganasri, B.P. and Ramesh, H. (2016) Assessment of Soil Erosion by RUSLE Model Using Remote Sensing and GIS—A Case Study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7, 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>

Gasc D., & Manfron G. (2023). État des cultures. Dégradation inattendue en fin de saison dans certaines zones de Méditerranée occidentale. Montpellier (France). CIHEAM-IAMM. 11 p. (Bulletin MED-Amin, n° 3). <https://www.med-amin.org/fr/ressources/bulletinprev/460-med-amin-forecasting-bulletin-2023-3-june/file>

Gbadamassi, F., Issa, M.S., Imorou, F., Barre, O., Adetona, L., Alhaji, A., Christian, Y.L., & Vodounou, J.B. (2022). Quantification de la perte en sol par usage du modèle RUSLE dans un SIG. Cas du bassin versant d'Affon-Donga. *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 37 No. 2 Sep. 2022, pp. 255-268.

GDO. (2023). (Observatoire mondial sur la sécheresse). Rapport sur la sécheresse au Maghreb. <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo>.

Gdiri A., Ben Cheikha I., Oueslati M., Saïdi S., & Reguigui N. (2024). Étude de l'érosion des sols à l'aide d'un traceur au césium 137 sous deux terres cultivées différentes dans le bassin versant d'El Kbir,

en Tunisie. *Euro-mediterr j environ integr* 9, 783–796 (2024). <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00497-0>.

Ghenim A., Terfous A., & Seddini A. (2007). *Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin versant de l'oued Sebdou (nord-ouest algérien) ». Sécheresse ; 18(1) : 39-44.*

Ghenim A., Seddini A., & Terfous A. (2008). *Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'oued Mouilah (nord-ouest algérien. Hydrological sciences journal ; 53(2) : 448-56.*

Ghenim & Megnounif, (2011). *Caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (nord-ouest de l'Algérie). Revue scientifique et technique. LJEE N°18.*

Ghenim A N, & Megnounif A.(2013). *Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). Physio-Géo . p. 35-49. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3173>*

Ghenim A. N., & Megnounif A. (2016). *Variabilité et tendance des précipitations journalières maximales annuelles dans le nord de l'Algérie. Journal international de géophysique, 2016. (11):1-11 <https://doi.org/10.1155/2016/6820397>*

Gherissi R. (2012) : *Hydrologie et modélisation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-NW Algérien, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 156 pages.*

Gherissi R, Baba Hamed K, & Bouanani A (2017) *Validation des modèles hydrologiques GR2M et GR4J sur le bassin de l'oued Lakhdar (Tafna, nord-ouest algérien). TSM 5:86–100. <https://doi.org/10.1051/tsm/20170 5087>*

Gherissi. R, Baba-Hamad.K & Bouanani.A (2021). *Mise en évidence de la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Lakhdar, Tafna, nord-ouest de l'Algérie. Arabe J Geosci 14, 984 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07094-3>*

Gherissi R., Kazi Tani H., Zegnouni A., & Belalia F.(2024). *Étude de l'apport sédimentaire lors des moments chauds dans la haute tafna : cas de la partie amont du sous-bassin versant de l'oued Sebdou, nord-ouest algérien. Résumés du deuxième congrès international sur l'ingénierie de l'énergie et des procédés industriels : volume 2. <https://doi.org/10.21467/abstracts.170>.*

Gheraout R., Zeggane H., & Remini B.(2020). *dynamique du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune (nord Algérie), la houille blanche, 106:4, 15-32, <https://doi.org/10.1051/lhb/2020038>.*

Ghribi M, & Dahech S., (2023). *Impacts des espaces verts sur la répartition des températures de l'air pendant la saison chaude dans l'agglomération de Sfax (centre-est de la Tunisie). Climatologie 2023, 20, 5. <https://doi.org/10.1051/climat/202320005>*

GIEC (2023) *Résumé à l'intention des décideurs. Dans : Core Writing Team, Lee H, Romero J (éd.) Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution des groupes de travail I, II et III au sixième*

rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, pp 1–34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-978929169647.001>

Giorgi F, & Lionello P (2008) Projections du changement climatique pour la région méditerranéenne. *Global and Planetary Change* 63 90–104.

Goksu SO (2023) Analyse comparative de l'influence de la température et des précipitations sur l'évaluation de la sécheresse dans la région de Marmara en Turquie : examen des indices SPI et SPEI. *J Water Clim Chang* 14(9) : 3096–3111. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.179>

Guidoum, A (2017). Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien. Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines constantinoises et Chott Melghir (Coupe Nord-sud).Thèse de Doctoral, Université Mohamed Khider - Biskra.

Greco J. (1966). *L'érosion - la défense et la restauration des sols - le reboisement en Algérie*. ed. m.a.r.a., alger, 393 p.

Guesri M.(2019). *Influence de la variabilité climatique sur la production des sédiments*. Thèse de doctorat 3ème cycle en : hydraulique. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.

Guha-Sapir, D. & Below, R. & Hoyois, Ph. (2021). *EM-DAT : Base de données internationale CRED/OFDA sur les catastrophes*. www.emdat.be

Hachemaoui O, Chabou M.C, Verati C, & Bersi M,(2022). Évolution du système de plomberie de la Province Magmatique Centre-Atlantique (CAMP) et ses possibles effets environnementaux durant la transition Trias-Jurassique : Apports des cheminées doléritiques du bassin de Tindouf, sud-ouest de l'Algérie, *Gondwana Research*, Volume 107, pp. 370-394, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.04.009>.

Hadjadj D. (1997). *La lutte contre l'érosion en Algérie*. *Bulletin de l'orstom* ; 17 : 168-75.

Hadour A, Mahé G, Meddi M (2020) Évolution hydrologique des bassins versants sous l'effet du changement climatique : un exemple du nord-ouest de l'Algérie. *J Hydrol : Reg Stud* 28 : 100671. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671>

Hadri, A., Saidi, M.E.M. , & Boudhar, A.(2021). Surveillance et comparaison multi-échelles de la sécheresse par télédétection dans une région aride méditerranéenne : une étude de cas du centre-ouest du Maroc. *Arab J Geosci* 14, 118 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06493-w>.

Hajji O , Abidi S , Mekni I & T Hermassi T.(2019). Quantification de l'érosion hydrique en contexte semi-aride méditerranéen (cas du bassin versant d'El Gouazine - Tunisie). *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE)* ISNN (ectronic): 1737-9350; ISSN (printed): 1737-6688; Volume IV - Numéro 1.

Hallouz F., Meddi M., & Mahe G.(2017). Régimes de flux de sédiments en suspension dans le bassin versant de l'oued Mina sur l'oued Cheliff (nord-ouest de l'Algérie). *Houille blanche-revue internationale de l'eau* (4) p. 61-71. <https://doi.org/10.1051/lhb/2017034>.

- Hallouz F., Meddi M., & Ali Rahmani S .E. (2020). Évolution de la concentration des sédiments en suspension et du débit liquide durant les crues et le phénomène d'hystérésis dans les sous bassins de l'oued Djdiouia (nord-ouest algérien). *Dynamiques environnementales*, 46, 66–89. <https://doi.org/10.4000/dynenviron.2872>.
- Hallouz F., & Meddi M.(2022). Une étude sédimentaire sur l'origine et la composition. Livre. Manuel des inondations : impacts et gestion. p 435. <https://doi.org/10.1201/9780429463327>.
- Hallouz F., Meddi M., Mahé G., Rahmani S.E.A., & Chebana F. (2023). Étude statistique des précipitations et du transport sédimentaire dans le nord-ouest de l'Algérie. in : kallel, a., et al. *selected studies in environmental geosciences and hydrogeosciences. cajg 2023. advances in science, technology et innovation*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43803-5_31.
- Hallouz F., Meddi M., Mahe G., Rahmani S.E.A ., & Zettam A. (2023). Analyse hybride de l'érosivité des précipitations dans le nord de l'Algérie : intégration des approches empiriques et de modélisation. *Pure appl. geophys.* 180, 3995–4023 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03360-5>.
- Hallouz F., & Meddi M.(2024). Chapitre Impact du changement climatique sur le rendement des sédiments. Études de cas en Afrique. Livre. Manuel des impacts du changement climatique sur la gestion des bassins fluviaux. <https://doi.org/10.1201/9781003473336>.
- Hammami H., Carreau J., Neppel I., Elasmî S., & Feki H. (2022). Modélisation spatiale lisse des précipitations extrêmes méditerranéennes. *Water*. 2022, 14, 3782. <https://doi.org/10.3390/w14223782>.
- Hargreaves GH, & Samani ZA (1985) Évapotranspiration des cultures de référence à partir de la température. *J Appl Eng Agric* 1(2):96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hasbaia M., Paquier A., & Herizi T. (2017). Modélisation hydrologique du transport sédimentaire en zone semi-aride, cas du bassin versant de la Soubella en Algérie. *Dans les ressources en eau en zones arides*.pp. 251-266. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51856-5_14.
- Heddadj D. (1997). La lutte contre l'érosion en Algérie. *bull. réseau - érosion (17)*, ed. ird, montpellier, 168-175.
- Hénia L (2001) Les grandes sécheresses en Tunisie au cours de la dernière période séculaire. *Eau Environnement et milieux méditerranéens*. ENS éditions. 25–36.
- Heusch B. (1970). L'érosion du pré rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *ann de la recherche forestière du Maroc ; 12*. pp : 9-176.
- Heusch B. (1986).Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. 22, n° 2, p. 53-162.
- Hmidi N. (2023). *Entre normes internationales et pratiques locales : diagnostic et propositions pour la gestion du risque inondation dans le grand Tunis*. Thèse de doctorat en géographie et aménagement de l'espace de l'université paul valéry- montpellier iii, 2023.

Horton, R. (1932) *Drainage Basin Characteristics*. Transactions, American Geophysical Union, 13, 350-361. <http://dx.doi.org/10.1029/TR013i001p00350>

Houmma, I. H., Hadri, A., Boudhar, A., Karaoui, I., Oussaoui, S., El Khalki, E. M., Chehbouni, A., & Kinnard, C. (2025). *Analyse des caractéristiques de propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique et de leurs effets conjoints sur la variabilité de la sécheresse à faible débit dans le bassin versant de l'Oum Er Rbia, Maroc*. *Téledétection*, 17(2), 281. <https://doi.org/10.3390/rs17020281>.

Hrouy Y, Thomasa Z, Foveta O, Sebarib K, & Rousseau-Gueutina P (2022) *Évolution des précipitations et des débits dans un bassin versant méditerranéen en réponse au changement climatique et aux activités humaines*. *J Water Clim Chang* 13(9):3253–3273. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.074>

Hudson N.W. (1992). *Gestion des terres*. Londres. Bastford. 192p.

INM,(2020). *Institut national météorologie. Communication Nationale de la Tunisie sur les Changements Climatiques*.

Isia I, Hadibarata T, Jusoh MNH, Bhattacharjya RK, Shahedan NF, Bouaissi A, Fitriyani NL, & Syafrudin M (2023) *Analyse de la sécheresse basée sur l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisé et l'indice de précipitations normalisé au Sarawak, Malaisie*. *J Sustain* 15(1):734. <https://doi.org/10.3390/su15010734>

Jaldi AS, (2022). *La situation du climat et de la biodiversité au Maghreb*. Livre. Publication. Centre de politique pour le nouveau Sud.

Jelassi, M., Gachon, P., & Laprise, R. (2016). *Occurrence, durée et intensité des précipitations simulées par deux modèles régionaux canadiens du climat sur la région du Maghreb*. *Atmosphere-Ocean*, 54(5), 469–497. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1228522>

Joannon A.(2004). *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques : cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du pays de Caux, Haute-Normandie*. Thèse de doctorat agronomie. Établissement(s) : Paris, institut national d'agronomie de Paris Grignon.

Johannot A.(2022). *Estimation du transport solide en rivière Alpine et incertitudes*. Mémoire fin d'étude du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES.

Kara B., & Nemdili A.(2014). *Les mesures préventives de lutte contre l'envasement des barrages*. Colloque international sur la lutte contre l'envasement des barrages. (M'sila les 23-24 juin 2014).

Kassou, A., Essahlaoui, N., Azzi, Y., & Essahlaoui, A. (2023). *Quantification de l'Érosion Hydrique au Niveau du Bassin Versant à l'Amont du Barrage Hassan II, Haute Moulouya, Maroc, par l'Équation Universelle de Perte en Sol*. *European Scientific Journal*, ESJ, 19(9), 284. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n9p284>

Kazi Tani H.A., Bouanani A., & Baba-Hamed K.(2017). Estimations et quantifications des apports solide et liquide du bassin versant du Meffrouche (nord-ouest algérien). *Techniques sciences méthodes* ; 9 : 35-44. <https://doi.org/10.1051/tsm/20179035>.

Kazi Tani H.A.(2019). Estimation et modélisation des transports solides, utilisation du SIG pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique. Application au bassin versant du barrage Meffrouche. Thèse de Doctorat en science en hydraulique. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen.

Kazi Tani H. A., Gherissi R., Zegnoui A., Otmane A., & Terfous A. (2020). Relations entre les débits liquides et les flux de matières en suspension dans la haute Tafna : cas de la partie amont du sous-bassin versant de l'oued Sebdou (nord- ouest algérien). *Techniques sciences méthodes* ; 7/8 : 79-89. <https://doi.org/10.36904/tsm/202007079>.

Kazi Tani H., Gherissi R., Zegnoui A., Bouanani A., Baba Hamed K, Terfous A., & Probst J.I.(2023). Impact de la variabilité du régime pluvial saisonnier sur les ruissellements et l'érosion des versants (cas du bassin versant du barrage de Beni-Bahdel). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. p. 127-139 <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.17901>.

Keddar, A., Touaïbia, B. & Arabi, M.(2011). Degré d'impact des aménagements hydrauliques sur le ruissellement et le transport solide dans une région semi-aride : cas des micro-bassins dans le haut Isser, Algérie. *Afrique Science* 07(3) (2011) 55 – 62.

Ketrouci K., Meddi M., Meddi., & Abdesselam B (2012) Étude des inondations extrêmes en Algérie : cas du bassin versant de la Tafna. *Science et changements planétaires - Sécheresse*. <https://doi.org/10.1684/sec.2012.0353>.

Keyantash J & Dracup J.A (2002) La quantification de la sécheresse : une évaluation des indices de sécheresse, *Bulletin de l'American Meteorological Society* 83 (8), 1167-1180.

Khalidi, A. (2005). Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien" Monts de Tlemcen-Saida. Thèse de doctorat, université d'Oran, Algérie.

Khanchoul, H.K., Boukhrissa, Z. E. A., Acidi, A. & Altschul, R. J. Q. I. (2012). Estimation du transport de sédiments en suspension dans le bassin versant du Kébir, Algérie. *Journal of Quaternary International*, 262, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.08.016>

Khemiri k., & Jebari S. (2021). Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un système d'information géographique. *cah. agric.* 30(2): 7. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020048>.

Kheniche S., Louamri A., & Taabni M.(2019). Estimation du transport solide et evolution de la relation « debit liquide- débit solide » dans un bassin semi-aride (cas de l'oued Mellegue amont), Algérie orientale. *Sciences & technologied– n°50, décembre 2019* .71-80.

Khezazna A.(2017). Les changements climatiques au Nord-est algérien Evolution récente et projections futures. Thèse de doctorat en Hydraulique. Université Badji Mokhtar. Annaba.

Koulinski.V.(1993). Étude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain. Thèse de doctorat en Mécanique. Université Joseph Fourier (Grenoble, Isère, France ; 1971-2015)

Kourat T, Smadhi D, & Madani A (2022) Modélisation de l'impact futur du changement climatique sur la production de blé dur pluvial en Algérie. *Climate* 10(4):50. <https://doi.org/10.3390/cli10 040050>

Kourat S, Touaibia B, Yahiaoui A (2022) Courbe Débit-Durée-Fréquence : Modélisation du régime des crues du bassin versant de l'oued Mazafran au nord de l'Algérie. *J Water Land Dev.* <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.141563>

Kouri I. (1993). L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina. Étude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

kouri I., & Gomer D. (2010). Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell Oranais Algérie. *Revue science et changements planétaires/sécheresse*, 21(4), 257-265.

Laouina A. (1998). Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *bull. réseau érosion n° 18*, ed. ird, montpellier, 33-53.

Larabi A., Driouech F., & Alaoui M.(2023). Un danger clair et immédiat. Les défis du changement climatique et de l'eau au Maghreb. Livre. publisher : UNESCO 2023. (organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture).

Lasgaa, I. (2012). Le berriasien de la region d'Ouled Mimoun : micropaléontologie, sédimentologie et paléoenvironnements (Tlemcen, Algérie nord occidentale). Mémoire de magister. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers département des sciences de la terre et de l'univers.

Lebdi F., & Maki A.(2023). La sécheresse au Maghreb : diagnostic, impacts et perspectives pour le renforcement de la résilience du secteur agricole. tunis. fao. <https://doi.org/10.4060/cc7126fr>.

Lelieveld J., Proestos Y., Hadjinicolaou P. , Tanarhte M., Tyrlis E., & Zittis G .(2016). Forte augmentation des extrêmes de chaleur au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (MENA) au XXIe siècle. *Changement climatique* 137, 245–260 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1665-6>.

Lionboui H, Boudhar A, Lebrini Y, Htitiou A, Elame F, Hadria R , & Benabdelouahab T. (2022). Digitalisation et développement agricole : le cas du Maroc. Dans : Behnassi, M., Baig, M.B., Sraïri, M.T., Alsheikh, A.A., Abu Rishah, A.W.A. (éd.) Sécurité alimentaire et systèmes alimentaires intelligents face au climat. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92738-7_16

Ludwig, W., & Probst, J.-L. (1998). Déversement de sédiments fluviaux dans les océans ; contrôles actuels et bilans globaux. *American Journal of Science*, 298(4), 265–295. <https://doi.org/10.2475/ajs.298.4.265>

Ludwig W, Dumont E, Meybeck M, & Heussner S.(2009).Décharges fluviales d'eau et de nutriments dans la Méditerranée et la mer Noire : principaux facteurs de changement des écosystèmes au cours des décennies passées et futures ?, Volume 80, Numéros 3–4,2009,Pages 199-217,ISSN 0079-6611, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>.

Maaliou, A., Mouzai, L., & Bouhadef, M. (2014). Evaluation et cartographie de l'indice d'érosivité de pluie 'R' de deux grands bassins versants en Algérie (côtier et algérois et Isser). *Hydrologie, Algérie Équipements*, 53, 28-37.

Maamar K.(2019). Développement d'outils spatiaux et cartographie des risques d'érosion hydrique des sols dans le Tell Oranai. Thèse de doctorat en sciences. Filière : sciences agronomiques. Université Abdelhamid Ben Badis Mostaganem.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) Relation entre la fréquence et la durée des sécheresses et les échelles de temps. Actes de la huitième Conférence de climatologie appliquée, Anaheim, Californie. Boston, American Meteorological Society, p. 179-184.

Madani Cherif H., Khanchoul K., Bouanani A., & Terfous A. (2017). Prévion du rendement sédimentaire en période de tempête dans le nord-ouest de l'Algérie. *arab j geosci* 10, 198 (2017).<https://doi.org/10.1007/s12517-017-2983-3>.

MADR. (2010).Ministère de l'agriculture et du développement rural. Rapport national sur la neutralité dans la dégradation des terres. 2010. Ghazi Z. responsable du rapport.

MADRP. (2015). Ministère de l'agriculture, du développement rural et de la peche.. Rapports national sur l'état de la biodiversité pour l'alimentation et l'agriculture en Algérie. Mr Hamid Hemdani Directeur de l'Organisation Foncière, de la mise en valeur et la Protection des Patrimoines (génétiques)

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon n., Recking a., & Baran p. (2011) - éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema-Cemagref Lyon, Toulouse, Grenoble, ministère chargé de l'écologie, Université Lyon 2, Collection comprendre pour agir, 216 p.

Malpede M, & Percoco M (2023) .Climat, désertification et développement humain local : données issues de 1 564 régions du monde. *Ann Reg Sci* 72 : 377–405. <https://doi.org/10.1007/s00168-022-01204-z>

Mami A.(2020). Impact des changements climatiques sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau : cas du bassin versant de la Tafna. Thèse de doctorat. Sciences de la terre. Institut national polytechnique de Toulouse- inpt; université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf Algérie.

Mankouri, M., (2009) : Contribution a l'étude de l'érosion en nappe, du ruissellement et de la fertilité des sols dans le B.V de l'Isser (sous bassin de Gourari et Madjoudj). Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen Algérie.

Markhi, A., Laftouhi, N.-E., Soulaïmani, A., & Fniguire, F. (2015). Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrée dans un SIG. Application dans le bassin versant N'FIS dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). *Européen scientifique journal, esj*, 11(29). <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/6342>

Marko O., Gjoka K., Shkodrani N., & Gjipalaj J.(2023). Effet du changement climatique sur l'érosion des sols dans le bassin de la rivière Vjosa. *Journal of ecological engineering* 2023, 24(2), 92–100 <https://doi.org/10.12911/22998993/156831>.

Marghmi A., Ben Cheikha I., Mabrouk El Asmi A., & Gueddari M.(2024). Évaluation des risques d'érosion des sols du bassin versant de Lakhmess (nord-ouest de la Tunisie) via le modèle Seagis : priorisation inférée des sous-bassins versants à risque. *Revue internationale de recherche sur les sédiments*, volume 39, numéro 6, pages 868-884. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.08.001>.

Mathlouthi, M., & Lebdi, F. (2024). Analyse statistique des événements de sécheresse extrême dans la région subhumide tunisienne basée sur les lois de probabilité. *Actes d'ingénierie*, 68(1), 66. <https://doi.org/10.3390/engproc2024068066>.

Mathbout S, Lopez-Bustins JA, Martin-Vide J, Bech J, & Rodrigo FS (2018) Analyse spatiale et temporelle de la variabilité de la sécheresse à plusieurs échelles de temps en Syrie entre 1961 et 2012. *Atmos Res*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.016>

Mazour, M. (1992). Les facteurs de risque de l'érosion et du ruissellement dans le bassin versant de l'IsserTlemcen- Algérie. *Bulletin du Réseau Erosion* 12:300--313.

Mazour M., & Roose E. (2002). Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du nord – ouest de l'Algérie. *Bulletin réseau érosion, IRD, Montpellier (France)*, 21: 320-330.

Mazour M. (2004). Étude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser-Tlemcen Algérie. Thèse de doctorat d'état en foresterie. 184 p.

Mazouzi, K., Hmaid, A. E., Bouabid, R., & El Faleh, E. M. (2021). Quantification de l'érosion hydrique, par la méthode RUSLE, au niveau du bassin versant de l'Oued Mikkès en amont du barrage Sidi Chahed (région de Meknès, Maroc). *European Scientific Journal, ESJ*, 17(14), 256. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n14p256>

Meddi M.(1992). Hydro pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina Algérie. Thèse de doct, univ Louis Pasteur Strasbourg France. 390 p.

- Meddi M., Khaldi K., & Meddi H. (1998). *Étude du transport solide dans le nord de l'Algérie*. *iahs publication*, 393-397.
- Meddi, M., (1999). *Etude du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Ebda (Algérie)*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 43, 167–183.
- Meddi &Humbert (2000), *Variabilité pluviométrique dans l'Ouest Algérien durant les cinq dernières décennies*. *Association internationale de climatologie*. Vol (13).
- Meddi M. (2013). *Evolution du transport sédimentaire et de l'érosivité des précipitations dans douze bassins du centre et de l'ouest de l'Algérie*. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.7, (2): 253-263. <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v7n2.253263>.
- Meddi, M., & Hubert, P. (2014). *Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie*. *IAHS-AISH publication*, 229-235.
- Meddi H., Meddi M., & Assani A. (2014). *Étude de la sécheresse dans sept plaines algériennes*. *The arabian journal of science and engineering*, 39: 339-359. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0827-3>.
- Meddi M. (2015). *Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord*. *larhyss journal*, (24), 315-336.
- Medjerab, A. & Henia, L. (2005). *Régionalisation des précipitations annuelles dans le nord-ouest de l'Algérie*. *Revue Géographique de l'Est*, 45, 56-69. <https://doi.org/10.4000/rge.501>
- MEER. (2023). *Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables. Premier rapport biennal actualisé de l'Algérie a la convention cadre des nations unies sur le changement climatique*.
- Meghraoui M.(2019). *Analyse spatio-temporelle de l'érosion dans les monts de Sabaa Chioukh (nord-ouest algérien) : recherche des facteurs conditionnels*. Thèse de doctorat en foresterie. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- Meghraoui M., Morsli.B, Regagba.M, Seladji.A.H.(2024). *Mesure du ruissellement et de l'érosion sur des par-celles de 1 m2 sous pluies naturelles dans les zones de montagne d'Algérie*. *Ann. Rech. For. Algérie* 2024, 14(1):43-55.
- Megnounif, A., Terfous, A., et Bouanani, A., 2003. *Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien)*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (3), 369–380. http://www.rse.inrs.ca/art/volume16/v16n3_369.pdf
- Megnounif, A., & Ghenim, A. N.(2011). *Caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (Nord-Ouest de l'Algérie)*. *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, 10(18), 59-77.
- Megnounif A., Terfous A., & Ouillon S. (2013). *Une méthode graphique pour étudier la dynamique des sédiments en suspension lors des crues de l'oued Sebdou, au nord-ouest de l'Algérie (1973-2004)*. *Journal of hydrology*; 497 : 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.029>.

Meguenni K., Remini B. (2008). Evaluation du debit solide dans le bassin versant de Harreza (Algerie) . *Journal Larhyss* ; 07 : 7-19.

Mehdouani M. (2022). Des risques liés à l'eau dans les environs du barrage de Sidi Saad (Tunisie centrale). *Revue Marocaine de Géomorphologie*. N°6. (2022). PP. 1- 32. ISSN: 2508-9382

Mezouar.K.(2020). Relations Sol-Végétation dans la région sud de Tlemcen. Thèse de doctorat. Université Aboubakr Belkaïd.Tlemcen. Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers département d'écologie et environnement.

Mhamed A, Djellouli F, Bouanani A, Baba Hamed K, Al faisal A, & Khairul H (2022) Évaluation du comportement du bassin versant de l'oued Louza dans le nord-ouest de l'Algérie en conditions de sécheresse hydrologique.*J Earth Syst Environ* 7(3):297–306. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00325-x>

Millares, A., Chikh, H. A., Habi, M., Morsli, B., Galve, J. P., Perez-Peña, J. V., et Martín-Rosales, W. (2020). Tendances saisonnières de la charge sédimentaire en suspension et évaluation de l'érosion-transport dans un bassin méditerranéen. *Revue des sciences hydrologiques*, 65(6), 969–983. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1724294>

Milliman, J.D. et Meade, R.H. (1983) Apport mondial de sédiments fluviaux aux océans. *Journal of Geology*, 91, p. 1-21. <https://doi.org/10.1086/628741>

Misset C., Recking A., Legout C., Valsangkar N., Bodereau N., & Zanker S. (2020). La dynamique des sédiments en suspension dans un tronçon de rivière alpin typique : aperçu d'une étude saisonnière. *Water resources research*, 55(12), 10918–10934. <https://doi.org/10.1029/2019wr025222>.

Mokhtari E. (2018). Évaluation de l'érosion des sols par le modèle RUSLE à l'aide de la télédétection et du SIG. Étude de cas du bassin de Boussalem Algérie. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement* ISSN (ectronic)1737-9350 ; ISSN (printed) 1737-6688 ; Vol. III – N.1

Morsli B. (1996). Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne. Cas des Monts de Beni Chougrane-Mascara. Thèse de magister en sciences agronomiques, ina d'alger, 166 p.

Morsli, B., Seladji, A., & Kaci, O. (2012). Dynamique de l'érosion sous différentes utilisations du sol au niveau d'un versant en zone méditerranéenne subhumide : influence des cultures, des aménagements de GCES et des couvertures forestières en Algérie. In Éric Roose, H. Duchaufour, & G. De Noni (éds.), *Lutte antiérosive (1-)*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12686>

Morsli B., Habi M., & Meddi M.(2013). Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne : facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. *Revue des sciences de l'eau. Journal of water science*. Volume 26, numéro 2, 2013. <https://doi.org/10.7202/1016061ar>.

Mostephaoui M., Merdas S., Sakaa B., Hanafi M., & Benazzouz M. (2013). Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système

d'information géographique dans le bassin versant d'Elhamel (Boussaâda) Algérie. *Journal algérien des régions arides n° spécial*.2013. pp: 131–147.

Mouzouna C., & Ould Saadi Z. (1994). Contribution à l'aménagement hydraulique de la vallée d'Oued Lakhdar (ex : oued Chouly). *Mémoire. Ingéniorat d'état, Univ. Tlemcen*, 164 p., 49 fig.

Nath, S., Shanti, R. K., & Nath, Y. (2021). Influence du changement climatique anthropocène sur la perte de biodiversité dans différents écosystèmes. *Global Climate Change* (pp. 63-78). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00001-0>

NDMC, (2005). *National Drought Mitigation Center (centre national d'atténuation de la sécheresse)*.

Nedjraoui & Bédrani,(2008). La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *La revue électronique en sciences de environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.5375>.

NEGGAZ F.Z., (2012). Application du modèle RUSLE et du système d'information géographique pour l'évaluation du degré de sensibilité des sols à l'érosion hydrique.Cas de la zone marneuse du bassin versant de l'oued Mina. *Thèse de magister. Université de Abdelhamid Benbadis-Mostaganem, Algérie*. 116 p.

Nichane M & Khelil M.A. ,(2015). Changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Journal article : Algerian Journal of Arid Environment*, 2015, Vol. 5, No. 1, 56-62 ref. 12.

Nouaceur Z, Laignel B, & Turki I.(2013). Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Géographie Physique et Environnement*. p. 307-323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>.

Nouaceur Z ., & Murărescu O, (2016). Analyse de la variabilité et des tendances des précipitations annuelles en Afrique du Nord.<https://doi.org/10.1155/2016/7230450>

Nouaim .W, Rambourg.D, El Harti.A, Abderrahim.E, Merzouki.M, & Karaoui .I.(2023). L'estimation de l'érosion hydrique avec RUSLE et modèle de dépôt. Une étude de cas du bassin versant du barrage de Bin El-Ouidane (Haut Atlas, Maroc). *Journal of Water and Land Development*, 2023, 58, pp.136-147. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.146606>

Okoth P.F. (2003). Une méthode hiérarchique pour l'évaluation de l'érosion des sols et la modélisation spatiale des risques. *Thèse de l'université de Wageningen*. 232 p.

OMM.(2023). *Organisation météorologique mondiale. Rapport sur l'état du climat en Afrique*.

OMM (2021). *Le rapport provisoire de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2021, État du climat en 2021: des phénomènes météorologiques extrêmes et de lourdes conséquences*

ONAGRI.(2024). *Rapport de l'Observatoire national de l'agriculture sur le taux de remplissage des barrages en Tunisie*.

ONU,(2022). Organisation des nations unies. La Journée de la désertification et de la sécheresse Espagne.2022.

OSS.(2009). Observatoire du Sahara et du Sahel. Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb\ OSS. _ Collection Synthèse n° 4. _ OSS : Tunis, 2008. _ 84 pp. ISBN : 978-9973-856-39-5.

Otmane A, Baba-hamed K, Bouanani A, & Kebir LW (2018) Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Mekerra (nord-ouest algérien). J Tech Sci Methods 9:23–37. https://doi.org/10.1051/tsm/20180_9023

Ouadjane Y., Ait Yacine E-A., Benzougagh B., Nassiri L. & Ibjibijen J. (2021). Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal En Amont De La Vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc). European Scientific Journal, ESJ, 17(21), 66. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n21p66>

Ouallali A. , Kader S. , Bammou Y. , Aqnouy M., Courba S. , Beroho M., Briak H. , Spalevic V., Kuriqi A., & Hysa A.(2024). Évaluation de l'intensité de l'érosion et des écoulements dans la région du Rif sous différents scénarios d'utilisation et de couverture des terres. Land 2024, 13, 141. <https://doi.org/10.3390/land13020141>.

Ouamane, A., Sekkour, I., & Athmani, B. (2022). Mobilisation des eaux de surface : observations générales sur les barrages en Algérie, passés, présents et futurs. Agua Y Territorio Water and Landscape, 20, e5298. <https://doi.org/10.17561/at.20.5298>

Ouassanouan Y, Fakir Y, Simonneaux V, Kharrou H, Bouimouass H, Najar I, Benrhanem M, Sguirg F, & Chehbouni A (2022). Analyse multi décennale des ressources en eau et des changements agricoles dans un piémont irrigué semi-aride méditerranéen en situation de pénurie d'eau et d'interaction humaine. Sci Total Environ. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155328>

Oubadi M., Hamou A., Faci M., & Farhi Y.(2020). Impacts des canicules sur les contraintes environnementales dans la région de Béchar. Journal algérien des régions arides (JARA) 14 (1) : 80-101 (2020).

Oubadi M., Hamou A., & Tedim F. (2021). Tendances à la hausse des températures et allongement de la période chaude en été dans le sud-ouest algérien, 1951–2010. acta geographica lodziensia, 111, 203–211. <https://doi.org/10.26485/agl/2021/111/13>.

Oubadi M., Faci M., & Pham Q.B.(2024). Tendances de la sécheresse et de l'aridité dans la steppe algérienne. Theor Appl Climatol 155, 1541–1551 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04865-2>.

Ousmana H. , El Hmaldi A., Essahlaoui A., Bekri H., & El Ouali A.(2017). Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives pap/car. Cas du bassin versant de l'oued Zgane (moyen atlas tabulaire, Maroc). Bulletin de l'institut scientifique, rabat, section sciences de la terre, 2017, n° 39, 103-119.

- Palmer WC (1965), *Recherche météorologique sur la sécheresse*, n° 45. U.S. Weather Bureau, p. 58
- Peace, N. (2020). *Impact du changement climatique sur la biodiversité des insectes, des ravageurs, des maladies et des animaux*. *Revue internationale Environmental science & natural resources Article de synthèse*, 23(5).
- Pei Z, Fang S, Wang L, & Yang W (2020) *Analyse comparative des sécheresses signalées par le SPI et le SPEI à différentes échelles de temps en Mongolie-Intérieure*. *China Water* 12(7):1925. <https://doi.org/10.3390/w12071925>
- Pereira LS, Cordery I, & Iacovides I (2009) *Faire face à la pénurie d'eau. Relever les défis*. Springer, Dordrecht, 382 p.
- Polovina S., Radic B., Ristic R., & Milcanovic V. (2024). *Application de la télédétection pour identifier les processus d'érosion des sols à l'échelle régionale : une approche innovante pour améliorer le modèle de potentiel d'érosion*. *Remote sens.* 2024, 16, 2390. <https://doi.org/10.3390/rs16132390>.
- Potopova V, Boroneant C, Mozny M, Stepanek P, & Skalak P (2014) *Caractéristiques spatio-temporelles observées de la sécheresse à différentes échelles de temps en République tchèque*. *J Theor Appl Climatol* 115(3–4):563–581. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0908-y>
- Poulos S.E. et Collins M.B. (2002). *Flux sédimentaires fluviales vers la mer Méditerranée : une approche quantitative et l'influence des barrages*. Dans Jones S.J. et Frostick L.E. (dir.), *Flux sédimentaires vers les bassins : causes, contrôles et conséquences*. Publications spéciales, Geological Society, Londres, 191, p. 227-245. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.191.01.16>
- Probst, J. L., & Suchet, P. A. (1992). *Transport fluvial de sédiments en suspension et érosion mécanique au Maghreb (Afrique du Nord)*. *Revue des sciences hydrologiques*, 37(6), 621–637. <https://doi.org/10.1080/02626669209492628>
- Quinquis M, (2017). *Relations entre bassins versants et cellules sédimentaires littorales : les exemples du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie*. Thèse de doctorat. École Doctorale Espaces, Cultures, Sociétés (Aix-en-Provence).
- Rais M., Gherissi R., & Kazi Tani H. (2024). *Évaluation des impacts du changement climatique sur le bassin versant de l'Oued Iakhdar : nord-ouest de l'Algérie*. *Résumés du deuxième congrès international sur l'ingénierie de l'énergie et des procédés industriels : volume 2*. <https://doi.org/10.21467/abstracts.170>.
- Ramdani M. (1993). *Caractéristiques lithologiques des bassins versants de barrages en liaison avec leur sensibilité à l'érosion*. ANRH- rapport interne. Alger.
- Raymond F., Ullmann A., Trambly Y., Drobinski F., & Camberlin P. (2019). *Évolution des périodes de sécheresse extrême en Méditerranée pendant la saison des pluies sous l'effet du changement climatique*. *Reg environ change* 19, 2339–2351 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01526-3>.

- Remaoun K. (2003). *Le bassin-versant de l'Oued Tafna (Algérie occidentale) : mise en place du réseau hydrographique et processus morphogéniques à l'origine de l'organisation du bassin*. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie pp. 73-82
- Remini, B. (1997). *Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage*. Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin.
- Remini, B. et Avenard, JM (1999). *Les conséquences de l'ensablement des barrages : quelques exemples algériens ; Les conséquences de l'envasement des barrages : quelques exemples algériens*. Techniques, Sciences, Méthodes : Génie Urbain-Génie Rural.
- Remini B. (2000). *L'envasement des barrages : quelques exemples algériens*. Revue bulletin du réseau érosion. Pages 165-171.
- Remini W., & Remini B., (2003). *La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord*. Éditeur : larhyss journal, Algérie. pp : 45-54.
- Remini B., Hallouche O., Achour B. (2009). *Chapitre 08 L'Algérie : plus d'un siècle de des envasement des barrages*. Ouvrage intitulé : *Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009*, édité par UNESCO Office in Rabat, pp. 123-142.
- Remini B., Bensafia D. et Nasroun T. (2015). *Impact du transport sédimentaire de l'oued Chellif sur l'envasement du réservoir de Bougezoul (Algérie)*. Revue de l'aménagement du territoire et des eaux. N° 24, p. 35–40
- Remini B., Bouabibsa R., & Moudjed K. (2019). *Beni Haroun et Koudiat Acerdoune (Algérie) : deux grands barrages algériens menacent par le phénomène de l'envasement*. larhyss journal, 38 (2019), 131-151.
- Renima, M., Zeroual, A., Hamitouche, Y., Assani, A., Zeroual, S., Soltani, A.A., Mulowayi Mubulayi, C., Taibi, S., Bouabdelli, S., Kabli, S., Ghammit, A., Bara, I., Kastali, A. & Alkama, R. (2022). *Améliorer l'estimation future du débit Cheliff-Mactaa-Tafna via un ensemble d'approches de correction de biais*. Climat, 10(8), 123. <https://doi.org/10.3390/cli10080123>
- Reolid M, Marok A, & Lasgaa I (2014) *Taphonomie et ichnologie : outils d'interprétation d'un intervalle de crue maximale dans le Berriasien du domaine de Tlemcen (Atlas tellien occidental, Algérie)*. Facies 60 : 905–920. <https://doi.org/10.1007/s10347-014-0413-5>
- Rezak, S., Laborde, J. P., & Errih, M. (2012). *Validation d'un modèle numérique de terrain adapté à la modélisation hydrologique régionale sur l'Algérie du Nord*. Hydrological Sciences Journal, 57(5), 928–941. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.685742>
- Rodier, J. & Roche, M. (1984). *Répertoire mondial des crues maximales observées*. IAHS Publ. no. 143.
- Rocle N., Bray X., Nivet A.C., Gresser J., & De la foye F.X. (2012). *Processus érosifs et transport solide en milieu tropical insulaire. Cas des bassins versants de la Baie du Robert, Martinique, fwi*. Livre

lutte antiérosive. *Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. Éditeur :IRD éditions.

Roose E (1980) *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. Etude des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Travaux et Documents 130. Paris: ORSTOM

Roose E. (1993). *Gestion de l'eau et de la fertilité des sols - une nouvelle approche pour lutter contre l'érosion et améliorer la productivité des terres, en acceptant les stratégies et technologies de conservation des sols et de l'eau*. Distl, Witzzenhausen, RCA, 129-164.

Roose E., Chebbani R., & Bourougaa I. (2000). *Ravinement en Algérie, typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation*. *bull. réseau-érosion* (19), ed. ird, montpellier, 122-138.

Roose E., Sabir M., Arabi M., Morsli B., & Mazour M. (2012). *Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb*. *Physio-géo* (6): 43-69. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2319>.

Rouissat B., (2016). *Analyse systémique appliquée aux aménagements hydrauliques*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Département d'hydraulique.

Sabah T., Asri A., Remini B., & Hamoudi S.(2018). *Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (nord-ouest algérien)*. *Géomorphologie relief processus environnement*. 24(2):167-182. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12083>.

Sadeuk Ben Abbes A, Meddi M, Renima M, & Bouderbala A (2020) *Analyse des caractéristiques des crues dans le contexte de la variabilité climatique dans le cas du bassin versant du Chélif en Algérie du Nord*. *Environ Sci Geogr*. https://doi.org/10.1007/698_2020_525

Sadiki A. (2005). *Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental : application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique*. Thèse doctorat d'état. Université Mohamed V, Oujda, 320 p.

Sadaoui M, Ludwig W, Bourrin F, & Romero E. (2018). *L'impact de la construction de réservoirs sur les sédiments fluviaux et les flux de carbone vers la mer Méditerranée*, Volume 163,2018, Pages 94-111, ISSN 0079-6611, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.08.003>.

Sahana V, Mondal A, & Sreekumar P (2021) *Évaluation de la vulnérabilité et des risques de sécheresse en Inde : analyse de sensibilité et comparaison des techniques d'agrégation*. *J Environ Manag* 299:113689. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113689>

Schilling J., Hertig E., Trambly Y., & Scheffran J .(2020). *Vulnérabilité au changement climatique, ressources en eau et implications sociales en Afrique du Nord*. *Reg Environ Change* 20, 15 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>.

Sebbar, A., Hsaine, M., Hassan Fougrach, H. & Wadi, B. (2019). *Caractérisation de la sécheresse climatique au Maroc*. UNESCO, Paris.

Sebbar A, Fougrach H, Hsaine M, & Badri W.(2022). *Évolution du régime pluviométrique sur un siècle dans la province de Settat, Maroc*. 35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie – AIC 2022.

Sghaira S.(2022). *Dynamique de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de Gafsa nord (Tunisie méridionale)*. *Espace géographique et société marocaine*.p.47-61. <https://doi.org/10.34874/imist.prsm/egsm/30555>.

Shaban A., & Khawlie M .(1998). *Évaluation géoenvironnementale des zones riveraines soumises à des événements climatiques extrêmes : une étude de cas de rivières représentatives au Liban*. *Symposium sur les processus et la gestion des rivières et des zones riveraines méditerranéennes*, Saragosse, Espagne, 21 septembre - 2 octobre 1998, 25 p.

Simsek O, Yildiz-bozkurt S, & Gumus V (2023) *Analyse de la sécheresse météorologique avec différentes méthodes dans la région de la mer Noire, Turquie*. *J Acta Geophys*. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01099-0>

Slimani M., Cudennec C., & Feki H.(2007). *Structure du gradient pluviométrique de la transition méditerranée–Sahara en Tunisie : déterminants géographiques et saisonnalité*. *Revue des sciences hydrologiques*, 52(6), 1088–1102. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1088>.

Souidi Z.I., Hamimed A., & Donze F.(2014). *Cartographie du risque de dégradation des terres en région semi-aride. Cas des Monts de Beni-Chougrane dans le Tell Occidental algérien*. *geo-eco-trop* 18 (1), 85-102.

Soutter, M., A. Mermoud & A. Musy, (2007), *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 294 p.

Spinoni J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P, & Vogt J (2014) *Fréquence, durée et gravité des sécheresses mondiales pour la période 1951-2010*. *Int. J. Climatol*. 34 : 2792–2804.

Stefanidis S., & Stathis D.(2018). *Effet du changement climatique sur l'érosion des sols dans un bassin versant méditerranéen montagneux (Pinde central, Grèce)*. *Eau* 2018, 10(10), 1469 ; <https://doi.org/10.3390/w10101469>.

Stefanovic I., Ristic R., Dragovic N., Stefanovic M., Zivanovic N., & Cotric J.(2024). *Effets des travaux de lutte contre l'érosion : étude de cas – réservoir de Celije, bassin de la rivière Rasina, rivière Zapadna Morava (Serbie)*. *Eau* 2024, 16, 855. <https://doi.org/10.3390/w16060855>.

Stocker, B. D., Zscheischler, J., Keenan, T. F., Prentice, I. C., Seneviratne, S. I., & Peñuelas, J. (2019). *Les impacts de la sécheresse sur la production primaire terrestre sous-estimés par la surveillance par satellite*. *Nature Geoscience*, 12(4), 264-270.

Sud A., Sajan B., Kanga S., Singh s.k., Singh S., Durin B., Kumar P., Meraj G., Sahariah D., Debnath J., & Chand K. (2024). *Intégration du modèle RUSLE à l'analyse géospatiale basée sur le cloud : une approche du moteur Google Earth pour l'évaluation de l'érosion des sols dans le bassin versant de Satluj*. *Eau* 2024, 16, 1073. <https://doi.org/10.3390/w16081073>.

Syvitski J.P.M, Peckham S.D, Hilberman R, & Mulder T, (2003). *Prévision du flux terrestre de sédiments vers l'océan mondial : une perspective planétaire*, *Sedimentary Geology*, Volume 162, Numéros 1-2, pp. 5-24, [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00232-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00232-X).

Taabni M. & El Jihad M.D. (2012). *Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ?*. *Les cahiers d'outre-mer*, 260. 2012 ; <https://doi.org/10.4000/com.6718>.

Tabet-Aoul, M. (2008). *Eau et climat. Vulnérabilité climatique des ressources en eau*. Communication Nationale Initiale (CNI) de l'Algérie à l'UNFCCC.

Tadrist N., Debauche O., & Xanthoulis D. (2016). *Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne : cas du barrage de Boukourdane (Algérie)*. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement* 20 (4), 453-467. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13281>.

Taïbi S, Meddi M, Souag D, & Mahe G (2013) *Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936-2009)*. In: E Boegh, E Blyth, DM Hannah, H Hisdal, H Kunstmann, B Su, KK Yilmaz (Eds) *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*, IAHS Publ. 359, pp. 191–197.

Taïbi S, Feddal M A, Meddi M, & Mahé G. (2017). *Etat de la variabilité pluviométrique du nord de l'Algérie entre 1936 et 2016 : un retour vers la normale*. *Conférence Internationale Hammamet. Tunis. Ressources en Eau & Changement Climatique. Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau*.

Taïbi, Sabrina, Meddi, Mohamed, & Mahé, Gil. (2019). *Variabilité saisonnière des précipitations sur la frontière sud de la Méditerranée : observations, simulations de modèles régionaux et projections climatiques futures*. *Atmosfera*, 32(1), 39-54. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.04>

Taïbi S., Anza F.Z.H., & Zeroual S. (2021). *étude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin d'Ain Dalia (Algérie)*, *algérien j. env. sc. technologie*, 7:2 (2021) 1860-1869.

Taïbi, S., Zeroual, A., & Melhani, N. (2021). *Evaluation de deux méthodes de correction de biais des sorties de modèles climatiques régionaux Cordex-Africa pour la prévision des pluies : cas du bassin côtier oranais*, *Proc. IAHS*, 384, 213–218, <https://doi.org/10.5194/piahs-384-213-2021>, 2021.

Taleb, A., (2004). *Etude du fonctionnement de l'écosystème oued. Rôle du milieu hyporhéique dans l'évolution de la qualité des eaux en aval du barrage de Hammam Boughrara sur la Tafna*. Thèse. Doctotat. Univ. Tlemcen. : 104 p.

Taylor, C., Belušić, D. & Guichard, F. (2017) La fréquence des tempêtes extrêmes au Sahel a triplé depuis 1982 selon les observations satellitaires. *Nature* 544, 475–478. <https://doi.org/10.1038/nature220699>

Tassin, C.(2012).Paysages végétaux du domaine méditerranéen. Livre. IRD Éditions, 2012, <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9781>.

Terwayet Bayouli O., Zhang W., & Terwayet Bayouli H.(2023). Combinaison du modèle RUSLE et de l'indice de santé de la végétation pour démêler la relation entre l'érosion des sols et les sécheresses dans le sud-est de la Tunisie. *J. arid land* 15, 1269–1289. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0110-8>.

Terfous, A., Megnounif, A., et Bouanani, A., (2001). Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 14 (2), 175–187. http://www.rse.inrs.ca/art/volume14/v14n2_173.pdf

Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., De Jager, A., Di Ciollo, C., Fioravanti, G., Grimaldi, S., Hrast Essenfelder, A., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N. & Salamon, P.,(2023). Sécheresse en Méditerranée occidentale. EUR 31555 EN, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2023, ISBN 978-92-68-04518-3, <https://doi.org/10.2760/883951>, JRC134081.

Touaibia B., Gomer D., & Aidaoui A.(2000). Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'oued Mina en Algérie du nord. *bull. réseau érosion* (20), ed., IRD, Montpellier, 478-484.

Touaibia B., Aidaoui A., Gomer D., & Achite M. (2001).Quantification et variabilité temporelle de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du nord. *Hydrological sciences journal* ; 46(1) : 41-53.

Touaibia B. (2010). Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse* 2010 ; 21(1). pp : 1-6.

Toubal A.K., Achite M., Ouillon S., & Dehni A. (2018). Cartographie de l'érodibilité des sols à l'aide du modèle RUSLE pour prioriser le contrôle de l'érosion dans le bassin de l'oued Sahouat, au nord-ouest de l'Algérie. *Environ Monit Assess.* 190(4):210. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>.

Touitou, M., & Abul Quasem, A.-A. (2018). Changement climatique et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Etudes économiques et environnementales*, 18(45), 411–429. <https://doi.org/10.25167/ees.2018.45.23>

Toumi S., Meddi M., Mahé G., & Brou Y.T.(2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *hydrol. sci. j.* 58(7), 1542-1558.<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>.

- Toundoh. O.P., Tchiboza E.A.M., & Vissin E.W. (2020). Application du modèle empirique USPED à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin de la Yéwa au Bénin. *International journal of engineering science invention (ijesi)*, 9(1), 67-78.
- Tourki.M. (2019). Modélisation du transfert des flux hydro-sédimentaires et cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Kébir-Rhumel. Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.
- Tramblay Y., Ilasat M.C., Randin C., & Coppola E.(2020). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en Méditerranée. *Reg Environ Change* 20, 83 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01665-y>.
- Tramblay Y. & Somot S.(2018). Évolution future des précipitations extrêmes en méditerranée. *changement climatique* 151, 289–302 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>.
- Tribak A., Baena-Escudero R., Guerrero-Amador I.C., Amhani Z., Abahrour M., El Garouani A., & Arari K.(2021). Évaluation de l'occupation du sol et de l'érosion hydrique dans le sous-bassin montagneux de l'oued Ourtza (pré-rif oriental, Maroc). *investigations geográficas, en prensa*, (171), 4–20. (En espagnol) <https://doi.org/10.14198/ingeo.18851>.
- Turner J.S., Pierre St-Laurent., Marjorie A.M., Friedrichs Carl T. & Friedrichs.(2021). Effets de la réduction de l'érosion du littoral sur la clarté de l'eau de la baie de Chesapeake. *Science of the total environment* 769 (2021) 145157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145157>.
- UNDRR. (2021). Rapport spécial du GAR sur la sécheresse 2021. <https://www.undrr.org/media/49386/download>
- UNESCO.(2023). Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture. *Rapport mondial des nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2023. Partenariats et coopération pour l'eau.*
- Van Doren & Bartelli .(1956). Méthode de prévision des pertes de sol. *Agric Eng* 37:335-341
- Vennetier M (2020) Forêts et changement climatique. Le constat en région méditerranéenne. N° 33. La forêt. Relever les défis du changement climatique en France métropolitaine. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.3.05>.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, & López-Moreno JI (2010) Un indice de sécheresse multiscalaire sensible au réchauffement climatique : l'indice standardisé des précipitations et de l'évapotranspiration. *J Clim* 23(7) : 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Waha K., Krummenauer I., Adams S., Aich V., Baarsch F., Coumou D., Fader M., Hoff H., Jobbins G., Marcus R., Mengel M., Otto I.M., Perrette M., Rocha M., Robinson A., & Schleussner C.F .(2017). Impacts du changement climatique dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) et leurs implications pour les groupes de population vulnérables. *Reg Environ Change* 17, 1623–1638. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1144-2>.

- Walling, D. E. (1984). Les apports sédimentaires des rivières africaines. Dans : D.E. Walling, S.S.D. Foster et P. Wurzel (dir.), *Challenges in African hydrology and water resources (Symposium de Harare)*. Wallingford, Royaume-Uni : IAHS Press, IAHS Publ. 144, 265–283. Disponible en ligne à : http://iahs.info/redbooks/a144/iahs_144_0265.pdf
- Wallemacq, P., Guha-Sapir, D., McClean, D., CRED & UNISDR. (2015). *Le coût humain des catastrophes naturelles : une perspective mondiale*.
- Williams G.P. (1989). Concentration de sédiments en fonction du débit d'eau lors d'événements hydrologiques uniques dans les rivières. *Journal Hydrology* ; 111(1-4) : 89-106.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1958). Énergie des précipitations et sa relation avec la perte de sol. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Vol. 39(2) p. 285–291. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1960), Une équation universelle d'estimation des pertes en sol pour guider la planification des exploitations agricoles de conservation, *Actes du 7e Congrès international des sciences du sol*, vol. I, pp. 418-425.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1965. *Prévision des pertes dues à l'érosion pluviale sur les terres cultivées à l'est des Rocheuses : guide pour le choix des pratiques de conservation des sols et de l'eau*. Manuel agricole. N° 282. Washington. USDA, p. 47.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978), *Prévision des pertes dues à l'érosion pluviale. Guide pour la planification de la conservation*, Manuel d'agriculture, 537, 58 p.
- Wuillez M.N. (2019). *Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts*. *Papiers de recherche afd*, 108, 33 p. <https://www.afd.fr/fr/ressources/revue-de-litterature-sur-le-changement-climatique-au-maroc-observations-projections-et-impacts>.
- Wrathall D.J., Hoek J.V.D., Walters A., & Devenish A. (2018). *Stress hydrique et migration humaine : une revue globale et géoréférencée de la recherche empirique. Document de travail sur les terres et l'eau 11*. (fao : organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).
- WRI. (2019). (World Resources Institute). *La Tunisie, l'Algérie et le Maroc parmi les 27 pays au taux de stress hydrique élevé. Rapport de l'institut des ressources mondiales. Technival note, 2019*.
- Yahiaoui D. (2015) *Impacts des variations climatiques sur l'agriculture en Oranie. Mémoire de Magistère. Faculté des Sciences Naturelles et de la Vie. Département de Biologie. Université d'Oran*
- Yaméogo.A, Somé.Y.S.C, Palé.S, Sirima.B.A & Da.D.E.C.(2021). Application de SIG/RUSLE à l'estimation de l'érosion par ruissellement en nappe dans le bassin versant supérieur de la Sissili (Burkina Faso). *Geo-Eco-Trop.*, 2021, 45, 2: 299-310.
- Yang Z, Jianping L, Yuan T, & Jiao L (2024) Distinguer les mécanismes de précipitations extrêmes associés aux rivières atmosphériques et non atmosphériques dans le bassin inférieur du Yangtze. *J Clim*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0400.1>

- Yebdri , D. (2007) . *Evaluation des ressources superficielles dans un hydrosystème complexe par l'utilisation du modèle SWAT: Application au bassin versant de la Tafna*. *African . Water Journal* , 1 : 47
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaidi, A., Essahlaoui, A., & El Abassi, M. (2014). *Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia*. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 3(8), 83-91
- Yles F., & Bouanani A.(2017). *Production de sédiments en suspension et typologie des crues dans les zones steppiques algériennes : cas du bassin versant de l'oued Saida* ». *geo-eco-trop* ; 41(1) : 135-50.
- Youb O., Boultif M., Bouarfa S., Farhi Y., & Oubadi M.(2022). *Sensibilité climatique dans les steppes algériennes : indices de sécheresse et télédétection*. *Revue technium soc. sci. j. volume 31. pages 810*.
- Zaher H., Zouhri M., Benjelloun H., Chikhaoui M., Naimi M., & Sabir M.(2021). *Impact du changement de l'occupation des sols sur l'érosion hydrique et le comportement hydrologique des sols : cas du bassin Tleta au nord-ouest du Maroc*. *rev. mar. sci. agron. vol, 9(4), 643–650*.
https://www.agrimaroc.org/index.php/actes_javh2/article/view/1049.
- Zarch MAA, Sivakumar B, & Sharma A (2015) *Sécheresses dans un climat en réchauffement : évaluation mondiale de l'indice standardisé des précipitations (IPS) et de l'indice de reconnaissance de la sécheresse (IRS)*. *J Hydrol* 526 : 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071>
- Zekri, N., & Tounkob, A. (2021). *Cartographie de la vulnérabilité potentielle des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Tafna (Nord-Ouest Algérien)*. *Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques Et Vétérinaires*, 9(4), 608–615. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_JAVH2/article/view/1046
- Zeroual A., Meddi M., Bensaad S. (2013) *Impact du changement climatique sur le débit des rivières arides et semi-arides d'Algérie*. *Climate and Land Surface Changes in Hydrology* (Boegh E. et al. eds). *Association internationale des sciences hydrologiques, IAHS Publ., Wallingford*, 359, 105–110.
- Zeroual, A., Assani, A.A. & Meddi, M. (2017) *Analyse combinée de la variabilité des températures et des précipitations en relation avec les indices climatiques dans le nord de l'Algérie sur la période 1972-2013*. *Hydrology Research*, 48(2), 584–595.<https://doi.org/10.2166/nh.2016.244>
- Zeroual, A., Assani, A.A., Meddi, M. & Alkama, R. (2019) *Évaluation du changement climatique en Algérie de 1951 à 2098 selon la classification climatique de Köppen-Geiger*. *Climate Dynamics*, 52(1-2), 227–243.<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>
- Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., & Sánchez-Pérez, J. M. (2017). *Modélisation de l'hydrologie et du transport sédimentaire dans un bassin versant semi-aride et anthropisé à l'aide du modèle SWAT : le cas de la rivière Tafna (nord-ouest algérien)*. *Eau*, 9(3), 216.
<https://doi.org/10.3390/w9030216>

Zettam, A., (2018). *Transfert des Nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la Méditerranée ; Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins Nord Africains. Thèse de Doctorat LMD. Université de Tlemcen "Abou Bekr Blekaid/ INP Toulouse, Tlemcen, Algérie.*

Zeybekoğlu U, & Aktürk G (2021) Comparaison de l'indice Z de Chine (CZI) et de l'indice de précipitations standardisé (SPI) pour l'évaluation de la sécheresse dans le bassin du barrage d'Hirfanli, en Turquie centrale. *Arab J Geosci* 14:2731. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09095-8>

Zhang Q, Xu CY, & Zhang Z (2009) Évolution observée des épisodes de sécheresse/humidité dans le bassin de la rivière des Perles, en Chine, à l'aide de l'indice de précipitations et de l'indice d'aridité standardisés. *J Theor Appl Climatol*98(1):89–99. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0095-4>

Ziari A, & Medjerab A (2024) Impact de la sécheresse dans le nord-est algérien- étude comparative des indices SPI et SPEI. *Revista De Gestão Sociale Ambiental* 18(9):e06591. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-078>

Zitoun M.S. (2019). *Plan national secheresse algerie lignes directrices en vue de son opérationnalisation. Ministère de l'agriculture, du développement rural et de la pêche. Direction generale des forets.*

Zobiri M.(2010).*Analyse et évaluation des aménagements de conservation de l'eau et du sol à l'amont du barrage El Izdihar de Sidi Abdelli-Tlemcen.Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.*

Annexe 01

Contexte & importance de l'étude

1. Sécheresse; crues;érosion et transport solide



2. Examiner les origines et les répercussions de ces événements naturels



3. Comprendre l'étendue de leur impact

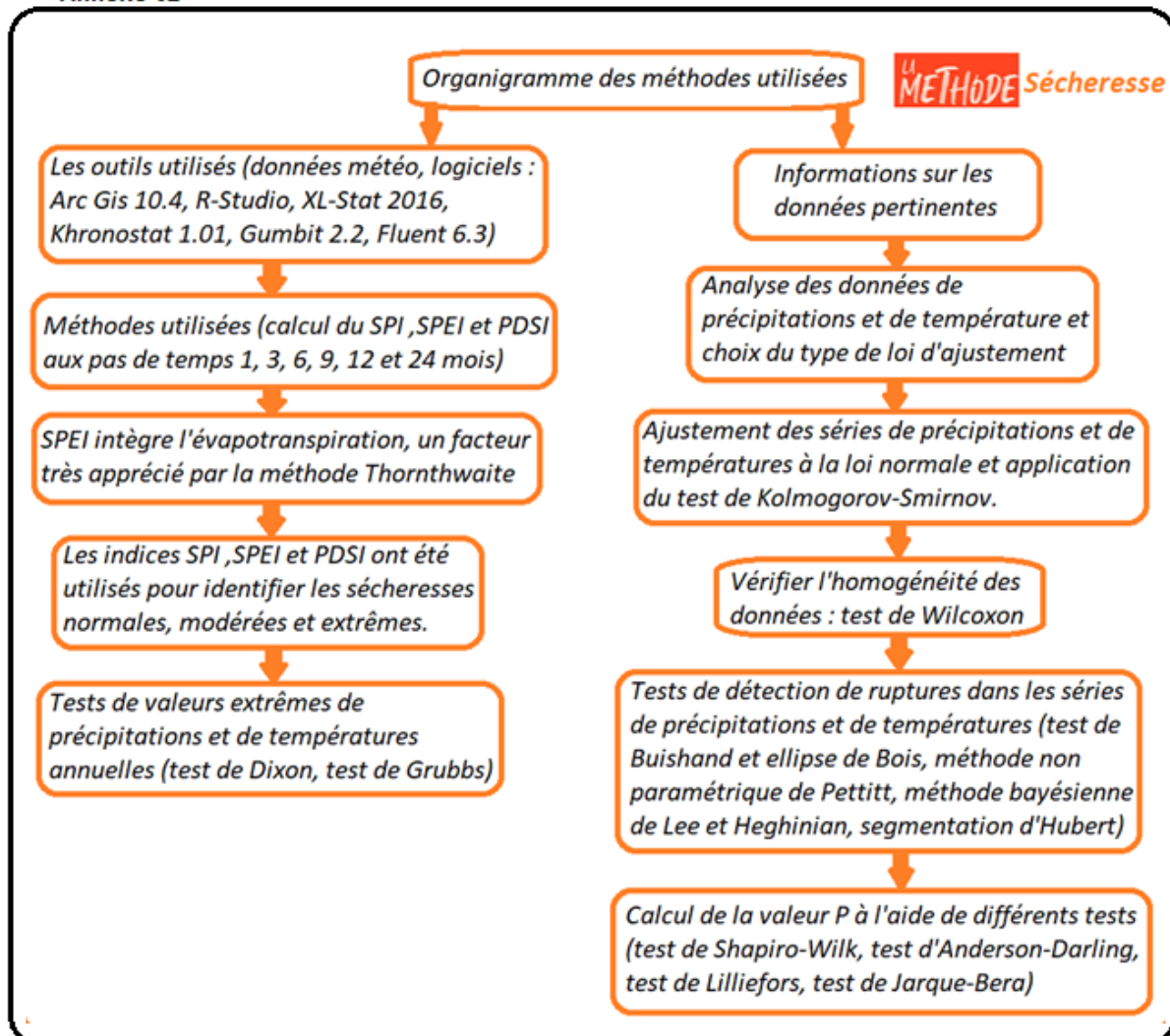


4. Identification des lacunes présentes dans des études précédents et combler ces manques



5. Souligner la pertinence et le potentiel impact de nos recherches sur la zone d'étude

Annexe 02



Annexe 03

