

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par : LABBAS Nihed Ghizlene

Sujet

**Contribution à l'étude de l'altération des écoulements de surface :
Cas du bassin versant de l'Oued Lakhdar.**

Soutenu publiquement, devant le jury composé de :

Mme ADJIM Hayet	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mr MEGNOUNIF Abdesselam	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
Mr GHENIM Abderrahmane Nekkache	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr GHENIM Omar	Dr	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : **2024 /2025**

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à **Allah**, Le Tout-Puissant, Le Très Miséricordieux, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, **Monsieur GHENIM Abderrahmane Nekkache**, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Sa rigueur, sa bienveillance et ses encouragements ont été d'un grand soutien.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur **GHENIM Omar**, mon co-encadreur, pour son appui constant, ses remarques constructives et son implication dans le suivi de ce travail. Sa collaboration a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Je remercie également **Madame ADJIM Hayet**, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'elle y accorde.

Je remercie aussi **Mr MEGNOUNIF Abdesselam**, examinateur, pour l'attention qu'il a portée à mon travail.

Mes derniers remerciements s'adressent à l'ensemble de mes professeurs et enseignants qui m'ont guidée tout au long de ma formation en Master, en partageant leur savoir avec passion et dévouement. Leur encadrement a été pour moi une source d'inspiration et de motivation constante.

À toutes ces personnes, je dis du fond du cœur : merci.

Dédicaces

À mes chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs prières silencieuses et leur soutien sans faille à chaque étape de ma vie. Ce travail est avant tout le fruit de leur dévouement.

À ma sœur et à mon frère,

Merci pour votre présence, votre affection et vos encouragements constants. Vous êtes une source de motivation et de réconfort dans les moments difficiles.

À mon fiancé,

Pour ta patience, ton soutien moral et ta confiance en moi. Merci d'avoir cru en moi même lorsque moi je doutais. Ce mémoire t'est aussi dédié.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance.

À tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui me sont chers,

Merci pour votre bienveillance, vos encouragements et votre présence à mes côtés. Votre soutien m'a profondément touchée.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة الحوض المائي لواد الأخضر) الذي كان يُعرف سابقاً بوادي الشولي (الواقع في ولاية تلمسان، من أجل تقييم التأثير المشترك للتغير المناخي والمنشآت المائية، وعلى رأسها تشغيل سد "الإزدهار"، على النظام الهيدرولوجي المحلي. بالاعتماد على سلاسل زمنية طويلة من التصريفات وبيانات الأمطار، تم استخدام عدة تقنيات تحليلية إحصائية، مثل اختبار "بيتيت" وطريقة التقسيم ونهج نطاق التغير (RVA)، للكشف عن التغيرات والاختلالات الهيدرولوجية. أظهرت النتائج انخفاضاً ملحوظاً في التصريفات، وزيادة في التذبذب الهيدرولوجي، بالإضافة إلى تغيير في توقيت حدوث التصريفات القصوى بعد تشغيل السد. تؤثر هذه التحولات بشكل مباشر على توفر المياه وتوازن النظم البيئية المائية، مما يبرز الحاجة إلى إدارة متكاملة ومستدامة للموارد المائية في المنطقة.

Résumé

Ce mémoire s'intéresse à l'étude du bassin versant de l'Oued Lakhdar (anciennement Oued Chouly), situé dans la wilaya de Tlemcen, afin d'évaluer l'impact combiné du changement climatique et des aménagements hydrauliques, notamment la mise en eau du barrage El Izdihar, sur le régime hydrologique local. À partir de séries chronologiques de débits et de données pluviométriques, l'étude applique plusieurs méthodes d'analyse statistique, comme le test de Pettitt, la méthode de segmentation et l'approche RVA (Range of Variability Approach), pour identifier les ruptures hydrologiques et les altérations des écoulements. Les résultats mettent en évidence une baisse significative des débits, une augmentation de la variabilité hydrologique, ainsi qu'un décalage dans les dates des débits extrêmes après la mise en service du barrage. Ces transformations affectent la disponibilité en eau et la dynamique des écosystèmes aquatiques, soulignant la nécessité d'une gestion intégrée et durable des ressources en eau dans la région.

Abstract

This thesis focuses on the study of the Oued Lakhdar watershed (formerly Oued Chouly), located in the Tlemcen region, to assess the combined impact of climate change and hydraulic developments, particularly the commissioning of the El Izdihar dam, on the local hydrological regime. Based on long-term flow records and rainfall data, the study applies several statistical analysis methods, such as Pettitt's test, segmentation method, and the Range of Variability Approach (RVA), to detect hydrological breaks and alterations in streamflow. The findings reveal a significant reduction in discharge, increased hydrological variability, and shifts in the timing of extreme flows following the dam's implementation. These changes affect water availability and aquatic ecosystem dynamics, emphasizing the need for integrated and sustainable water resource management in the region.

Les mots-clés : altération , Oued, débits, changement climatique, barrage, bassin versant

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicaces.....	II
الملخص	III
Résumé	III
Abstract.....	III
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XIII
Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I</u>	<u>Caractéristiques physiques du bassin versant</u>
I.1 Présentation du Bassin versant d'Oued Chouly	4
I.2 Caractéristiques physiques de la région.....	4
I.3 Hydrologie et caractéristiques du bassin versant.....	5
I.4 Délimitation du bassin.....	5
I.5 Caractéristiques de forme du bassin versant.....	5
I.5.1 Indice de compacité (Kc).....	5
I.5.2 Rectangle équivalent.....	6
I.5.3 Temps de concentration estimé (Tc)	6
I.5.4 Indice de forme de Horton (KH)	7
I.6 Données du réseau hydrographique.....	8
<u>Chapitre II</u>	<u>Méthode d'étude</u>
II.1 Introduction	11
II.2 Détermination de la date ou la rupture des débits	11
II.2.1 Méthode de segmentation	11
II.2.2 Le test de Pettitt	12
II.2.3 Méthode des Cumuls (Double Masse).....	12
II.3 La construction et la mise en eau du barrage El Izdihar.....	13
II.3.1 Caractéristiques techniques du barrage	13

II.4	Impact du barrage sur la zone étudiée après 1988	14
II.5	Indicateurs d'Altération Hydrologique	14
II.5.1	Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)	15
II.5.2	Evaluation des paramètres non-paramétriques	17
II.5.3	Analyse des « Range of Variability Approach » (RVA).....	18
II.5.4	Paramètres hydrologiques.....	18
II.6	Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles	19
II.6.1	Paramètres du Groupe #1	19
II.6.2	Débits médians mensuels (12 paramètres)	19
II.6.3	Débits médians mensuels par mois.....	19
II.7	Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes.....	19
II.7.1	Groupe de Paramètres #2.....	19
II.7.2	Paramètres des minima hydrologiques (étiages)	19
II.7.3	Paramètres des maxima hydrologiques (crues)	20
II.7.4	Nombre de jours à débit nul (<i>Number of zero-flow days</i>).....	20
II.7.5	Indice d'écoulement de base (<i>Base flow index</i>).....	20
II.8	Période des conditions hydrologiques extrêmes.....	20
II.8.1	Groupe de Paramètres #3.....	20
II.8.2	Date du débit minimal (<i>Date of minimum</i>).....	20
II.8.3	Date du débit maximal (<i>Date of maximum</i>).....	21
II.9	Fréquence et durée des impulsions hydrologiques	21
II.9.1	Groupe de Paramètres #4.....	21
II.9.2	Nombre d'impulsions de faible débit (<i>Low pulse count</i>)	21
II.9.3	Durée des impulsions de faible débit (<i>Low pulse duration</i>).....	21
II.9.4	Nombre d'impulsions de fort débit (<i>High pulse count</i>).....	21
II.9.5	Durée des impulsions de fort débit (<i>High pulse duration</i>)	22
II.9.6	Seuil des impulsions de faible débit (<i>The low pulse threshold</i>)	22
II.9.7	Seuil des impulsions de fort débit (<i>The high pulse threshold</i>)	22
II.10	Taux et fréquence des variations hydrologiques.....	22
II.10.1	Groupe de Paramètres #5.....	22
II.10.2	Taux de montée du débit (<i>Rise rates</i>)	22
II.10.3	Taux de descente du débit (<i>Fall rates</i>)	22
II.10.4	Nombre d'inversions hydrologiques (<i>Number of hydrologic reversals</i>)	23
II.11	Indicateurs de Magnitude et de Variabilité des Apports Hydrologiques	23
II.11.1	Magnitude des apports annuels (IHA1).....	23

II.11.2	Magnitude des apports mensuels (IHA2)	23
II.11.3	Variabilité normale des apports (IHA3).....	24
II.11.4	Variabilité extrême des apports (IHA4).....	24
II.11.5	Saisonnalité maximale (IHA5)	24
II.11.6	Saisonnalité minimale (IHA6).....	24
II.11.7	Magnitude des crues normales (IHA7).....	25
II.11.8	Variabilité des crues normales (IHA8)	25
II.11.9	Saisonnalité des crues (IHA9)	25
II.11.10	Magnitude des sécheresses normales (IHA10).....	26
II.11.11	Variabilité des sécheresses normales (IHA11).....	26
II.11.12	Saisonnalité des sécheresses (IHA12)	26
II.12	Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA)	27
II.13	L'échelle des IHA.....	27
II.1	Échelle d'évaluation des altérations hydrologiques	28
Chapitre III		Résultats
III.1	Détermination de la date de la rupture des débits.....	30
III.2	Effet changement climatique [1947-1976 / 1977-1988].....	30
III.2.1	Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles :	30
III.2.1.2	Diminution généralisée des débits mensuels	31
III.2.1.3	Altération hydrologique mensuelle (RVA)	31
III.2.2	Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact	33
III.2.2.1	Débits mensuels	33
III.2.2.2	Débits saisonniers	33
III.2.3	Échelle annuelle.....	34
III.2.4	Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes :.....	34
III.2.4.1	Débits maximaux	34
III.2.4.2	Débits minimaux.....	35
III.2.5	Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3	38
III.2.5.1	Analyse des dates des débits extrêmes et évaluation RVA	38
III.2.6	Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4	39
III.2.6.1	Analyse des impulsions de débit et évaluation RVA	39
III.2.7	Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5	41
III.2.7.1	Analyse des variations hydrologiques et évaluation RVA	41
III.2.7.2	Taux de montée du débit.....	42
III.2.7.3	Taux de descente du débit.....	42

III.2.7.4	Nombre d'inversions hydrologiques	42
III.3	Effet combiné du changement climatique et de la construction du barrage (1947–1976 / 1977–2020).....	44
III.3.1	Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles	44
III.3.1.1	Réduction des débits médians.....	44
III.3.1.2	Augmentation de la variabilité hydrologique	45
III.3.2	Évolution des valeurs extrêmes (débits minimaux et maximaux).....	45
III.3.2	Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact	47
III.3.2.1	Évolution des débits mensuels.....	47
III.3.2.2	Évolution des débits saisonniers.....	47
III.3.3	Échelle annuelle.....	48
III.3.4	Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #2.....	49
III.3.4.1	Débits maximaux.....	49
III.3.4.2	Débits minimaux.....	51
III.3.4.3	Évolution des crues maximales	53
III.3.4.4	Évolution des débits minimaux	53
III.3.5	Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3	55
III.3.6	Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4	56
III.3.7	Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5	58
III.3.7.1	Taux de montée du débit.....	58
III.3.7.2	Taux de descente du débit.....	58
III.3.7.3	Nombre d'inversions hydrologiques	58
III.3.7.4	Mise en eau du barrage en 1988 (avant/après 1988)	60
III.3.7.5	Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles Groupe de Paramètres #1.....	60
III.3.7.6	Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact	62
III.3.7.7	Échelle annuelle.....	63
III.3.7.8	Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #2	64
III.3.7.9	Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3 ...	69
III.3.7.10	Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4	70
III.3.7.11	Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5 ...	73
III.3.8	Indicateurs de Magnitude et de Variabilité des Apports Hydrologiques	75
III.3.8.1	Magnitude des apports annuels (IHA1).....	75
III.3.8.2	Magnitude des apports mensuels (IHA2).....	75

III.3.8.3	Variabilité normale des apports (IHA3).....	76
III.3.8.4	Variabilité extrême des apports (IHA4).....	76
III.3.8.5	Saisonnalité maximale (IHA5).....	77
III.5	Saisonnalité minimale (IHA6).....	77
III.3.8.7	Magnitude des crues normales (IHA7).....	77
III.3.8.8	Variabilité des crues normales (IHA8).....	78
III.3.8.9	Saisonnalité des crues (IHA9).....	78
III.3.8.10	Magnitude des sécheresses normales (IHA10).....	79
III.2.8.11	Variabilité des sécheresses normales (IHA11).....	79
III.3.8.12	Saisonnalité des sécheresses (IHA12).....	80
III.3.8.13	Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA).....	81
Chapitre IV		Discussion
IV.1	Comparaison des débits.....	83
IV.2	Évolution du régime hydrologique entre 1947 et 2021 : une altération progressive et structurante.....	83
IV.3	Comparaison des moyennes saisonnières.....	84
IV.4	Analyse des débits saisonniers avant et après impact : une altération progressive et contrastée.....	85
IV.5	Altération hydrologique d'après l'analyse RVA.....	86
IV.6	Résumé comparatif.....	86
Conclusion.....		87
Perspectives.....		88
Références bibliographiques.....		88

Liste des figures

Figure I- 1: Localisation du bassin versant d'Oued Lakhdar (Diaf, et al. 2024).....	4
Figure I- 2: Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lakhdar.....	8
Figure I- 3: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Lakhdar (Diaf, 2024).....	9
Figure III- 1: Méthode des cumuls des débits annuels	30
Figure III- 2: Altération hydrologique	32
Figure III- 3: Variation saisonnière et mensuelle des débits.....	33
Figure III- 4: L'évolution du débit annuel.....	34
Figure III- 5: Évolution des débits maximaux (1, 3, 7, 90 jours)	35
Figure III- 6: Évolution des débits minimaux (1, 3, 7, 90 jours).....	36
Figure III- 7: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	38
Figure III- 8: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	41
Figure III- 9: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	43
Figure III- 10: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	46
Figure III- 11: Variation saisonnière et mensuelle des débits	47
Figure III- 12: L'évolution du débit annuel.....	48
Figure III- 13: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours max)	49
Figure III- 14: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours max).....	50
Figure III- 15: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours min)	51
Figure III- 16: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours min)	52
Figure III- 17: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	54
Figure III- 18: Indice d'altération hydrologique selon RVA.....	56
Figure III- 19: L'altération hydrologique observée.....	57
Figure III- 20: L'altération hydrologique observée.....	59
Figure III- 21: L'altération hydrologique observée.....	61
Figure III- 22: Variation saisonnière et mensuelle des débits.....	62
Figure III- 23: L'évolution du débit annuel.....	63
Figure III- 24: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours max).....	64
Figure III- 25: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours max).....	65
Figure III- 26: L'altération hydrologique observée.....	65
Figure III- 27: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours min)	66
Figure III- 28: Variation interannuelle des débits (3 et 90 jours min)	67
Figure III- 29: L'altération hydrologique observée #3.3.....	69
Figure III- 30: Altération hydrologique observée des Débits (RVA).....	70
Figure III- 31: Altération hydrologique observée.....	72

Figure III- 32: Altération hydrologique observée (RVA).....	72
Figure III- 33: Débits médians et de leur variabilité #3.5.....	73
Figure III- 34: Altération hydrologique observée.....	74
Figure III- 35: Altération hydrologique observée (RVA).....	74
Figure III- 36: Graphe IHA2	76
Figure IV- 1: Comparaison des débits moyens avant et après impact	83
Figure IV- 2: Taux de réduction saisonnière du débit par période d'impact	84

Liste des tableaux

Tableau I- 1: Les altitudes caractéristiques du bassin versant d'Oued Lakhdar.....	8
Tableau I- 2: Caractéristiques du réseau hydrographique.....	9
Tableau II- 1: Caractéristique de la station hydrométrique de Chouly.....	11
Tableau II- 2: Les paramètres d'altération hydrologique (IHA).....	15
Tableau II- 3: Niveaux d'altération hydrologique en fonction de la valeur de l'indicateur IHA28	
Tableau III- 1: Les résultats des méthodes de rupture.....	30
Tableau III- 2: Débits médians mensuels et de leur variabilité #1.....	31
Tableau III- 3: Altération hydrologique (RVA)1.1.....	32
Tableau III- 4: Débits médians MAX/MIN et de leur variabilité #2.....	37
Tableau III- 5: Altération hydrologique (RVA)1.2.....	37
Tableau III- 6: Débits médians et de leur variabilité #3.....	39
Tableau III- 7: Altération hydrologique (RVA)1.3.....	39
Tableau III- 8: Débits médians et de leur variabilité #4.....	40
Tableau III- 9: Altération hydrologique (RVA)1.4.....	41
Tableau III- 10: Débits médians et de leur variabilité #5.....	42
Tableau III- 11: Altération hydrologique (RVA)1.5.....	43
Tableau III- 12: Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)2.....	44
Tableau III- 13: Débits médians et de leur variabilité #2.1.....	45
Tableau III- 14: Altération hydrologique mensuelle (RVA)2.1.....	46
Tableau III- 15: Débits médians et de leur variabilité #2.2.....	53
Tableau III- 16: Altération hydrologique (RVA)2.2.....	54
Tableau III- 17: Débits médians et de leur variabilité.....	55
Tableau III- 18: Altération hydrologique (RVA)2.3.....	55
Tableau III- 19: Débits médians et de leur variabilité #2.4.....	56
Tableau III- 20: Altération hydrologique (RVA)2.4.....	57
Tableau III- 21: Débits médians et de leur variabilité #2.5.....	58
Tableau III- 22: Altération hydrologique (RVA)2.5.....	59
Tableau III- 23: Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)3.....	60
Tableau III- 24: Débits médians et de leur variabilité #3.1.....	60
Tableau III- 25: Altération hydrologique (RVA)3.1.....	61
Tableau III- 26: Baisse (%) de moyenne saisonnière.....	63
Tableau III- 27: Débits médians et de leur variabilité #3.2.....	68
Tableau III- 28: Altération hydrologique (RVA)3.2.....	68
Tableau III- 29: Débits médians et de leur variabilité #3.3.....	69
Tableau III- 30: Altération hydrologique (RVA)3.3.....	70
Tableau III- 31: Débits médians et de leur variabilité #3.4.....	71
Tableau III- 32: Altération hydrologique (RVA)3.4.....	71

Tableau III- 33: Altération hydrologique (RVA)3.5.....	73
Tableau III- 34: Valeurs mensuels IHA2	75
Tableau IV- 1: Nature de l'impact, Taux de réduction du débit (%).....	84
Tableau IV- 2: Analyse de Réduction globale saisonniers des 3 périodes.....	85
Tableau IV- 3: Évolution mensuelle de l'altération hydrologique d'Oued Lakhdar selon trois scénarios d'impact	86

Liste des abréviations

Les abréviations sont classées par ordre d'apparition dans le texte.

Kc	Indice de compacité
Tc	Temps de concentration estimé
Kh	Indice de forme de Horton
Rc	Rapport de confluence
Ip	Indice de pente
Ig	Indice de pente global
Ds	Dénivelée spécifique
Dd	Densité de drainage
Ct	Coefficient de torrentialité
RVA	Range of Variability Approach : Méthode de l'Éventail de Variabilité.
A.N.R.H	Agence Nationale des Ressources hydrauliques.
IHA	Indicators of Hydrological Alteration : Les Indicateurs d'Altération Hydrologique.
Cv	Coefficient de variation
Cd	Coefficient de dispersion
GIHA	Indicateur Global d'Altération Hydrologique

Introduction générale

L'écoulement des cours d'eau joue un rôle essentiel dans la régulation des écosystèmes aquatiques et la gestion durable des ressources en eau. Il en résulte des interactions complexes entre les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et les échanges souterrains, sous l'influence de facteurs climatiques et géomorphologiques. La variabilité spatio-temporelle des débits définit le régime hydrologique d'un cours d'eau, un élément déterminant pour la préservation des écosystèmes aquatiques, la régulation des apports sédimentaires et l'approvisionnement en eau pour divers usages humains.

Depuis l'Antiquité, l'eau douce a été un facteur clé du développement des civilisations, celles-ci s'établissant principalement à proximité des cours d'eau. Toutefois, l'intensification des activités humaines et les effets croissants des changements climatiques ont modifié de manière significative les régimes hydrologiques naturels. Ainsi, à l'échelle planétaire, le cycle de l'eau connaît une forte variabilité spatiale et temporelle, ce qui a entraîné de nombreux problèmes liés à l'eau, mettant en péril la sécurité hydrique humaine (Yang et al., 2021). Par conséquent, une meilleure compréhension du cycle hydrologique et des ressources en eau est devenue une préoccupation majeure pour la recherche sur l'environnement et les ressources naturelles (Wang et al., 2010 ; Braga et al., 2014 ; Xia et al., 2017).

Les altérations qui affectent les écoulements de surface ont des répercussions directes sur la biodiversité aquatique, la qualité de l'eau et surtout sur la disponibilité des ressources hydriques. On estime que plus de quatre milliards de personnes sont touchées par des pénuries d'eau (Mekonnen et Hoekstra, 2016), d'où la nécessité d'une gestion adaptative et durable des systèmes hydrologiques.

Le régime hydrologique d'un cours d'eau est influencé par plusieurs processus, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration. L'équilibre de ces processus est essentiel pour assurer une gestion efficace et durable des ressources en eau. Cependant, diverses interventions humaines, telles que la construction de barrages, la dérivation des cours d'eau, l'urbanisation et l'intensification agricole, combinées aux fluctuations climatiques, perturbent ces régimes naturels (Maskey et al., 2022). Ce phénomène, appelé altération hydrologique, modifie significativement la dynamique des écoulements, avec des conséquences majeures sur les services écosystémiques.

Impacts des Activités Humaines et du Changement Climatique sur les Régimes d'Écoulement

L'intervention humaine et les changements climatiques sont les deux principaux facteurs influençant les régimes d'écoulement des cours d'eau :

- **Facteurs anthropiques** : L'urbanisation, la construction d'infrastructures hydrauliques, la surexploitation des nappes phréatiques, la modification de l'utilisation des sols et ont modifié les écoulements naturels. Les diverses conséquences telles que les inondations, la réduction de la surface de recharge due aux constructions, la pollution des ressources en eau, etc... perturbent le cycle hydrologique en influençant l'infiltration, le ruissellement et la recharge des nappes.

- **Facteurs climatiques** : L'augmentation des températures et les modifications du régime des précipitations, associées aux épisodes de sécheresse et aux crues brèves, fréquentes et intenses affectent directement les débits et la géomorphologie des cours d'eau. Ces variations exacerbent les déséquilibres hydrologiques, menaçant la sécurité en eau des populations.

Des stratégies adaptatives, telles que la gestion durable des bassins versants, la restauration des zones humides et l'optimisation des infrastructures hydrauliques, sont essentielles pour atténuer ces effets et garantir un approvisionnement en eau équilibré.

Conséquences Écologiques et Sociétales

L'altération des régimes hydrologiques impacte fortement les écosystèmes aquatiques et le bien-être humain. Les espèces aquatiques, adaptées à des conditions hydrologiques relativement stables, voient leurs cycles de vie perturbés, menaçant la biodiversité et les services écosystémiques associés.

En Algérie, où le stress hydrique est extrêmement prononcé, la variabilité des précipitations et l'augmentation des épisodes de sécheresse contribuent à la réduction des débits des cours d'eau. Ce phénomène affecte directement l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable et les activités économiques dépendantes de l'eau.

Objectifs de l'étude

Ce travail vise à analyser les impacts des activités humaines et des changements climatiques sur les régimes hydrologiques, avec un accent particulier sur l'altération des débits des cours d'eau. Plus précisément, cette étude cherche à :

- Évaluer l'impact conjugué de la sécheresse hydro-pluviométrique survenue dans la partie ouest du pays à partir du milieu de la décennie 1970 ainsi que la construction du barrage El Izdihar à Sidi Abdelli sur la modification du régime hydrologique du cours d'eau.
- Introduire et évaluer l'altération des débits mensuels et caractéristiques du cours d'eau.
- De faire une comparaison entre deux périodes caractéristiques dans l'occurrence des écoulements du cours d'eau.

L'étude est centrée sur l'Oued Chouilly, un petit bassin versant choisi pour la disponibilité des données et son niveau d'urbanisation relativement faible, permettant une meilleure évaluation des facteurs naturels. L'analyse porte sur l'évolution et les modifications temporelles des débits.

Structure du document

Ce travail débuté par une introduction générale, est organisé en quatre chapitres :

- **Chapitre 1** : Présentation du bassin versant et des données utilisées.
- **Chapitre 2** : Description de la méthode d'étude adoptée.
- **Chapitre 3** : Analyse et interprétation des résultats obtenus.
- **Chapitre 4** : Discussion des résultats et conclusion générale.

Enfin, des recommandations sont formulées pour orienter les recherches futures dans ce domaine, en mettant l'accent sur des approches intégrées pour une meilleure gestion des ressources en eau.

Chapitre I : Caractéristiques physiques du bassin versant

I.1 Présentation du Bassin versant d'Oued Chouly

La zone géographique ciblée par ce projet est celle d'Oued Lakhdar, appelé aussi « Oued Chouly » (**Figure I-1**). Il est situé dans la commune de même nom, à la partie orientale de la ville de Tlemcen. D'un point de vue administratif, la commune couvre une superficie de 13 646 km², peuplée d'environ 5 262 habitants lors du recensement de 2008 (Wikipedia, 2023).

Historiquement très riche, la région connaît une humanisation remontant à l'époque pré-ottomane, avec plusieurs villages tels que Yebdar, Béni Ghazli, MZoughen, Tamekchent, qui attestent d'une occupation humaine ancienne. Par ailleurs, si le nom Chouly émane d'un mot désignant un dromadaire âgé de sept ans à pelage rougeâtre, utilisé par les populations nomades qui transhument dans la région à la recherche de pâturages, la quasi-totalité de la population vient au préalable des steppes du sud (Sebdou, El Aricha), avant de se sédentariser progressivement sur ses terres avec le soutien au prince Abou Tachfine (Diaf, et al. 2024).

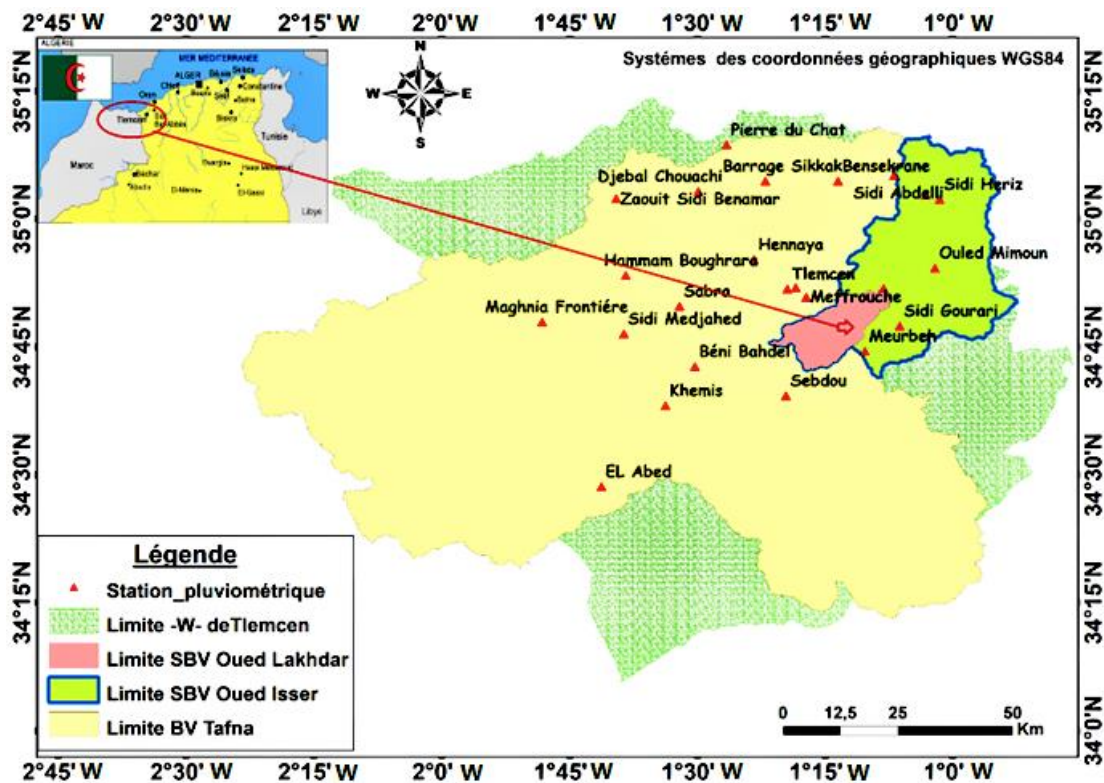


Figure I-1: Localisation du bassin versant d'Oued Lakhdar (Diaf, et al. 2024)

I.2 Caractéristiques physiques de la région

Les altitudes se caractérisent par un groupement de collines et de montagnes représentant plus de 70% de la superficie totale de la commune. Ce relief accidenté conditionne l'écoulement et la dynamique hydrologique de la région (Wikipédia, 2023).

Les sols majoritairement limoneux, associés à des argiles de type montmorillonite, confèrent au paysage coloris blanchâtre typique de la région (Wikipédia, 2023).

La couverture végétale est relativement clairsemée, composées de thuya, de doum, de diss, de pistachier nain, de chêne kermès et de plantations de pin d'Alep tels que résultent des campagnes de reboisement (Wikipédia, 2023).

I.3 Hydrologie et caractéristiques du bassin versant

L'Oued Lakhdar constitue un affluent de l'oued Isser, affluent de la Tafna. Il est contrôlé par la station hydrométrique n°160601. Le bassin versant est d'une superficie de 170 km² selon l'ANRH (2020) et 172,6 km² selon une analyse SIG sur un MNT, pour un périmètre de 70,1 km. Le cours d'eau principal est d'une longueur d'environ 30 km.

Il reçoit l'alimentation de plusieurs sources pérennes comme Aïn Tot Hamam, Aïn Ouissert et Aïn Béni Hella (Aït Benaouda, 2021 ; Benaouda, 2014). Le climat est semi-aride et la pluviométrie est de 381,9 mm/an sur une période de 41 ans (1979–2020) (Aït Benaouda, 2021). Le débit moyen mesuré de 1970/1971 à 2011/2012 est de 0,27 m³/s marquant une certaine modération dans la dynamique prévue du cours d'eau (Aït Benaouda, 2021).

En effet, le bassin est fortement érodé avec des apports solides très variables, le maximum est de 16 956 tonnes en 2008–2009 et la dégradation spécifique a été évaluée à 99 tonnes/km²/an (Diaf et al., 2021).

I.4 Délimitation du bassin

Le bassin versant est délimité de la manière suivante :

- Au nord : Monts de Tlemcen
- Au sud : bassin de Meffrouche
- À l'est : oued Isser
- À l'ouest : bassin de Sikkak.

La collecte des écoulements, en y ajoutant les zones qui la limitent, est d'un total de 288,9 km² de superficie pour 115 km de périmètre, alors même que la surface réellement drainée par la station hydrométrique est d'environ 170 km² (Gherissi et al., 2021 ; ANRH, 2020).

I.5 Caractéristiques de forme du bassin versant

L'analyse morphométrique d'un bassin versant permet de mieux comprendre sa dynamique hydrologique, notamment en ce qui concerne l'écoulement, la concentration des eaux et les risques d'inondation (Figure 2). Pour cela, plusieurs indices géométriques ont été calculés à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et des outils SIG.

I.5.1 Indice de compacité (Kc)

Le coefficient de Gravelius permet de caractériser la forme d'un bassin versant. Il correspond au rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle ayant la même superficie. Plus sa valeur se rapproche de 1, plus le bassin présente une forme compacte, ce qui réduit le temps de concentration des eaux.

Il est donné par la formule suivante :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Avec :

- P : périmètre du bassin (en km),
- S : superficie du bassin (en km²).

Pour le bassin d'Oued Lakhdar :

$$Kc = \frac{0,28 \times 70,1}{\sqrt{172,6}} \approx 1,50 \quad (2)$$

Ce résultat indique que le bassin est modérément compact. Plus Kc est proche de 1, plus le bassin est circulaire. Ici, la forme est légèrement allongée, ce qui peut allonger le temps de concentration.

I.5.2 Rectangle équivalent

Cette notion a été introduite afin de comparer les bassins versants en tenant compte de l'influence de leur forme sur l'écoulement. Elle consiste à définir un rectangle ayant la même superficie et le même indice de compacité que le bassin étudié.

Longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{kc \times \sqrt{s}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{kc} \right)^2} \right] = 29 \text{ km} \quad (3)$$

Largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{kc \times \sqrt{s}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{kc} \right)^2} \right] = 5,9 \text{ km} \quad (4)$$

Ici, Kc est le coefficient de compacité et S la superficie du bassin versant.

I.5.3 Temps de concentration estimé (Tc)

Il s'agit du temps nécessaire à une particule d'eau, issue du point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Ce temps de concentration est généralement estimé à l'aide de la formule de Giandotti.

Méthode empirique de Kirpich (adaptée aux petits bassins) :

$$Tc = \frac{4\sqrt{s} + 1,5L}{0,8\sqrt{(H_{moy} - H_{min})}} = \frac{4\sqrt{172,6} + 1,5 \times 29}{0,8\sqrt{(1130 - 722)}} = 6 \text{ h} \quad (5)$$

Avec :

Tc : temps de concentration (heure)

A : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

Hmoy : altitude moyenne (m)

Hmin : altitude minimale (m)

I.5.4 Indice de forme de Horton (KH)

L'indice de forme proposé par Horton (1932) est un outil simple mais très utile pour comprendre la morphologie d'un bassin versant. Il permet d'évaluer la relation entre la largeur moyenne du bassin et la longueur de son cours d'eau principal. Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$k_h = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

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 ($K_H = 0,18$) étant inférieur à 1, il indique que le bassin versant d'Oued Lakhdar présente une forme allongée. Le relief joue un rôle essentiel dans les processus de ruissellement, d'infiltration et d'évaporation. Situé dans le Massif Tellien, l'Oued Chouly (ancien nom d'Oued Lakhdar) traverse un relief montagneux qui agit comme une barrière naturelle contre les vents et offre un environnement propice à diverses formations géographiques.

La vallée, réputée pour sa fertilité, est encadrée par deux chaînes montagneuses parallèles:

- La première comprend les djebels Taksent, Tichtiouine, Mezoughène et Sidi Chaïb, avec un point culminant à 1311 m.
- La seconde regroupe des monticules comme le djebel Tazkninet, djebel Sidi Hamza, djebel Dar El Matmar et djebel Dar Sidi Cheikh, atteignant jusqu'à 1420 m.

Les altitudes les plus élevées, comprises entre 1500 et 1600 m, se trouvent au sud du bassin et représentent environ 2 % de la surface, avec un maximum de 1606 m. Les altitudes comprises entre 1300 et 1400 m couvrent la plus grande part du bassin (33 %). Le point le plus bas, à 722 m, se situe à l'exutoire.

Dans la vallée, les altitudes varient de 1063 m en amont à 722 m en aval, soit une dénivelée moyenne de 338 m sur 15 km, correspondant à une pente moyenne de 2,25 %. Environ 75 % de la surface du bassin (notamment au sud) présente un relief accidenté, caractéristique des Monts de Tlemcen.

Enfin, la topographie générale d'Oued Chouly se présente sous forme de cascade, descendant progressivement depuis le djebel Dar Sidi Cheikh (1420 m) jusqu'à Yebdar Hella (722 m).

L'altitude médiane, correspondant à $H_{50\%}$ sur la courbe hypsométrique, est estimée à 1170 m. L'amplitude altitudinale, définie par la différence $H_{5\%} - H_{95\%}$, atteint 700 m, traduisant un relief marqué (**Figure I-2**). Les pentes dans la zone d'étude sont majoritairement orientées vers le nord-ouest et le sud-ouest, tandis que les zones planes y sont très peu représentées.

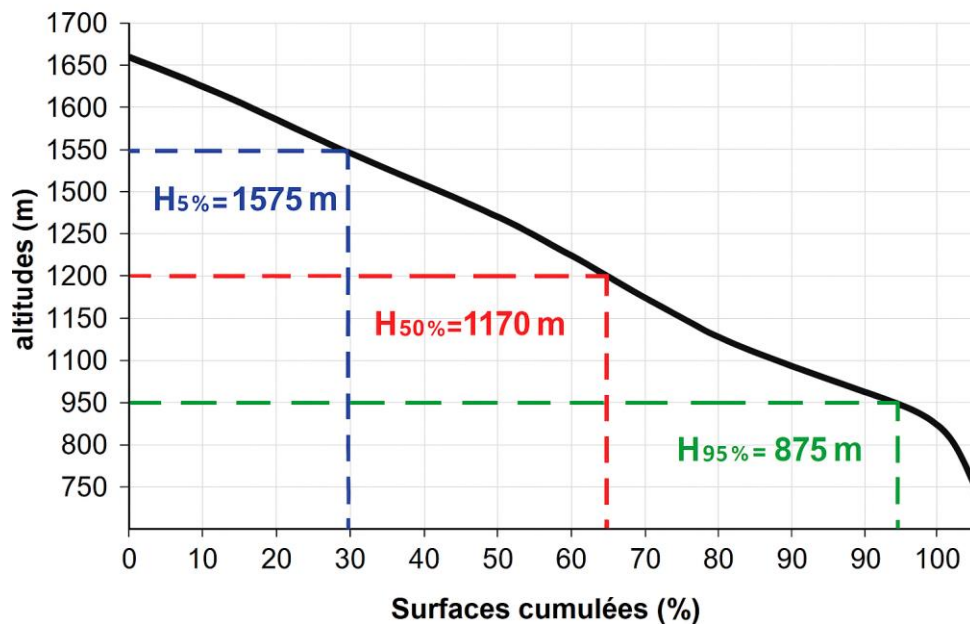


Figure I- 2: Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lakhdar

Un résumé des principales caractéristiques altimétriques est présenté dans le Tableau I-1

Tableau I- 1: Les altitudes caractéristiques du 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

I.6 Données du réseau hydrographique

Les caractéristiques du réseau hydrographique (**Figure I-3**) consignées dans le tableau I-2, ont été tirées des fiches de renseignements recueillis auprès de l'A.N.R.H et de (Gherissi, 2012) :

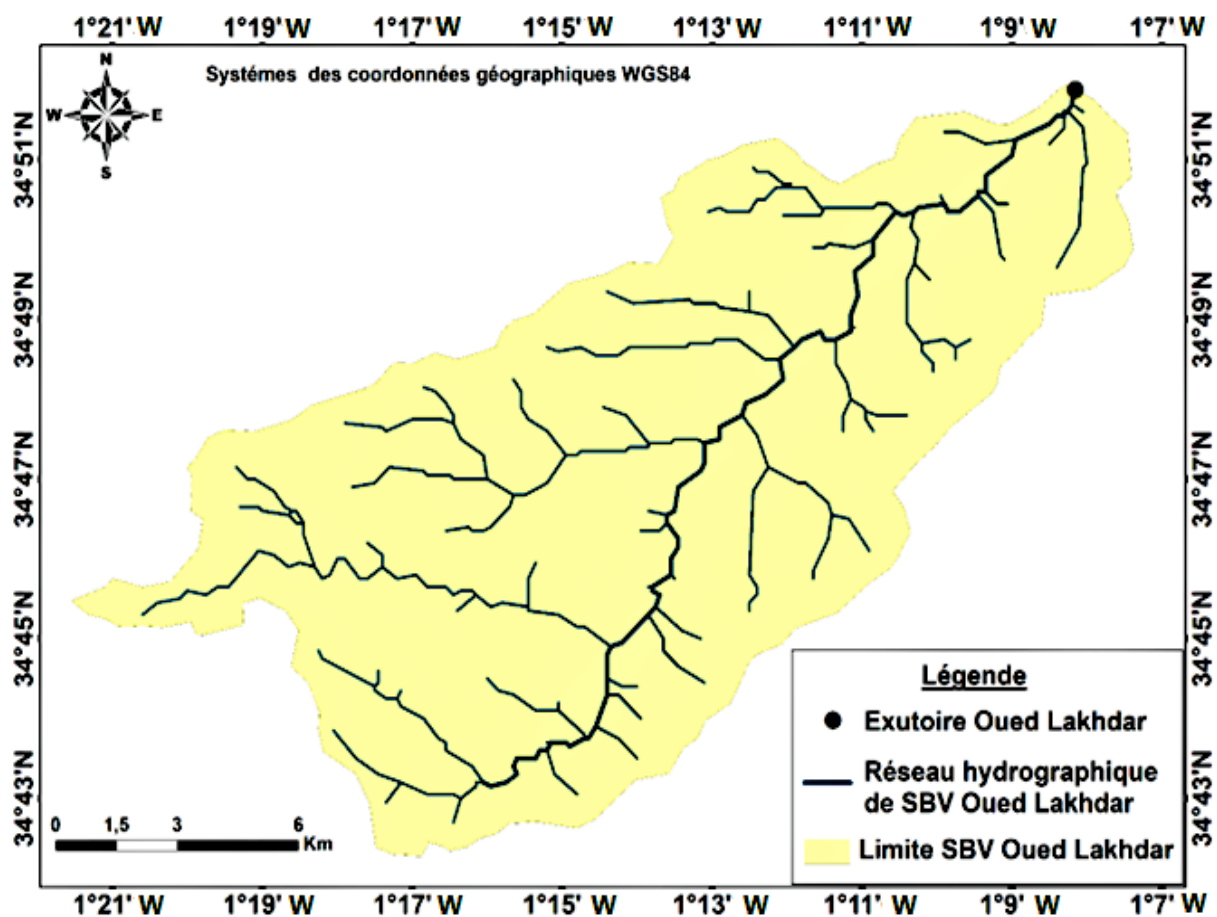


Figure I- 3: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Lakhdar (Diaf, 2024)

Tableau I- 2: Caractéristiques du réseau hydrographique

Caractéristiques	Valeurs	Origine
Rapport de confluence (Rc)	5,75	Gherissi, 2012
Indice de pente (Ip)	0,19	
Indice de pente global (Ig)	0,027	
Relief selon « Ig »	Assez fort	
Dénivelée spécifique (Ds)	628,8	
Relief selon « Ds »	Fort	
Densité de drainage (Km/Km ²)	3	A.N.R.H
Coefficient de torrentialité (Ct)	21,6	

Chapitre II : Méthode d'étude

II.1 Introduction

L'étude des séries temporelles hydrologiques permet de reconnaître et de comprendre les transformations des écoulements de cours d'eau sous l'influence de différentes causes de type naturel et humain.

L'évaluation de l'altération du régime hydrologique, introduite par Richter et al. (1997 ; 1998), repose sur la méthodologie conceptuelle de la *Range of Variability Approach* (RVA). Cette approche est utilisée pour estimer le niveau d'écart par rapport au régime d'écoulement naturel, lorsque celui-ci est perturbé par des interventions telles qu'un barrage ou une rupture de stationnarité.

Ce chapitre expose de manière complète l'approche méthodologique adoptée dans cette étude, en détaillant les outils mobilisés pour l'analyse des données du bassin versant de l'Oued Chouly. L'objectif est de mieux cerner les altérations du régime hydrologique et de mettre en lumière l'influence combinée des facteurs climatiques et anthropiques sur les dynamiques d'écoulement.

Dans le cadre du bassin versant étudié, deux types d'altération ont été identifiés :

- D'un côté, la rupture de stationnarité détectée dans les séries pluviométrique et hydrologique (la date précise restant à définir) ;
- De l'autre, la construction du barrage El Izdihar à Sidi Abdelli, intervenue en 1988.

La série des débits liquides journaliers de la station d'Oued Chouly entre 1947-48 et 2000-01 a été utilisée dans ce travail. Elle a été fournie par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H) (**Tableau II-1**).

Tableau II- 1: Caractéristique de la station hydrométrique de Chouly

Code station	Appellation	Mise en service	Longitude	Latitude	Elévation	Surface drainée
160601	Pont R.N 7	1925	01°08'05" W	34°51'53"N	720 m	170 ²

II.2 Détermination de la date ou la rupture des débits

II.2.1 Méthode de segmentation

La segmentation des séries chronologiques hydrologiques est une statistique puissante pour détecter des ruptures de stationnarité dans une série de données.

Elle a été développée par Hubert et ses collaborateurs (Hubert et al., 1989) puis approfondie par Hubert (2000). Initialement, cette méthode a été conçue pour étudier la rupture pluviométrique survenue en Afrique de l'Ouest vers la fin des années 1960. Par la suite, son champ d'application s'est élargi à l'analyse des régimes hydrologiques, notamment pour identifier les changements induits par les perturbations climatiques et les activités humaines.

Cette approche repose sur une subdivision optimale de la série temporelle en sous-périodes homogènes, en réduisant au maximum l'écart quadratique entre la série d'origine et les segments

obtenus. Les ruptures structurelles sont détectées à l'aide de critères statistiques rigoureux, et leur validité est confirmée par le test de Scheffé, qui permet de vérifier que les moyennes des segments sont statistiquement différentes.

Grâce à sa capacité à détecter plusieurs ruptures au sein d'une même série, la segmentation est largement utilisée pour analyser l'influence des variations climatiques et des aménagements hydrauliques sur les régimes d'écoulement. Elle a été mise en œuvre avec succès dans des contextes géographiques divers, notamment en Afrique de l'Ouest pour l'analyse des précipitations et des débits (Carbonnel et Hubert, 1994), ainsi qu'en Roumanie pour l'étude des tendances hydrologiques. La robustesse de cette méthode a été démontrée par Lubès-Niel et al. (1998), notamment avec un seuil de significativité de 0,01 dans le test de Scheffé.

II.2.2 Le test de Pettitt

Le test Pettitt (Pettitt, 1979) constitue une statistique non paramétrique pour identifier de façon significative un point de rupture dans une série temporelle, en évitant de faire des hypothèses sur la distribution des valeurs.

Il a été conçu pour détecter des changements notables dans la médiane des données et s'avère particulièrement adapté à l'analyse des séries hydrologiques, notamment les débits des cours d'eau, en raison de sa capacité à mettre en évidence des modifications causées par des variations climatiques ou des interventions humaines.

Le principe du test repose sur la détection d'un changement de tendance dans une série temporelle. Il utilise le test de rang de Mann-Whitney, qui compare deux sous-périodes en calculant la différence cumulée des rangs. Le point où cette différence atteint un maximum est identifié comme une rupture potentielle (Pettitt, 1979 ; Sneyers, 1990). Une fois ce point déterminé, une valeur seuil correspondant à un niveau de confiance (généralement de 95 %) permet de vérifier si la rupture est statistiquement significative.

Ce test a été largement utilisé dans des études hydrologiques pour examiner les tendances des précipitations et des débits. Il a notamment été mobilisé par Lubès-Niel et al. (1998) pour suivre l'évolution des ressources en eau, ainsi que par Kundzewicz et Robson (2004) dans le cadre d'analyses des changements hydrologiques à l'échelle mondiale. Sa fiabilité et sa simplicité d'application en font un outil précieux pour la détection des changements structurels dans les séries temporelles.

Dans le cadre de ce travail, le test de Pettitt sera appliqué aux séries de débits du bassin versant de l'Oued Chouly, dans le but d'identifier d'éventuelles ruptures hydrologiques et d'analyser l'évolution du régime d'écoulement sur la période étudiée.

II.2.3 Méthode des Cumuls (Double Masse)

La méthode des cumuls, aussi appelée méthode de la double masse, est une approche graphique permettant de détecter des ruptures d'homogénéité dans les séries chronologiques hydrométéorologiques. Elle repose sur la représentation cumulative des valeurs d'un paramètre au fil du temps, dans le but d'identifier d'éventuelles discontinuités dans la série. Lorsque les données sont homogènes, les points du graphique suivent une tendance linéaire régulière. À l'inverse, une variation marquée de la pente peut signaler une rupture dans la cohérence des données (Rhissa, 2018).

Cette technique est couramment utilisée pour évaluer la qualité et la régularité des séries de données hydrologiques et pluviométriques enregistrées dans une station donnée. Un changement soudain dans l'alignement des points peut indiquer des perturbations liées à des facteurs externes, tels que des évolutions climatiques, des modifications des conditions de mesure (comme un changement d'instrumentation ou de méthodologie), ou encore des erreurs de collecte.

Cependant, la méthode des cumuls présente une limite notable : elle ne repose pas sur un test statistique permettant de valider la significativité des ruptures détectées. En effet, certaines fluctuations naturelles peuvent induire des changements apparents dans la pente du graphique, sans qu'il y ait véritablement une rupture structurelle dans la série. Il est donc primordial de compléter cette méthode par des tests statistiques adaptés afin de distinguer les tendances réelles des anomalies visuelles (Bernier, 1977).

Malgré cette limite, la méthode des cumuls reste un outil de visualisation performant, particulièrement utile pour une détection préliminaire des anomalies dans les séries hydrométéorologiques. Elle permet ainsi d'orienter les analyses vers des investigations plus approfondies, en associant des méthodes statistiques complémentaires pour confirmer les ruptures identifiées.

II.3 La construction et la mise en eau du barrage El Izdihar

Le barrage El Izdihar, également connu sous le nom de barrage de Sidi Abdelli, est situé sur l'Oued Isser, à environ 2,5 km au nord du chef-lieu de la commune de Sidi Abdelli et à 8 km au nord-est de la daïra de Ben Sakrane, dans la wilaya de Tlemcen, Algérie. Mis en service en janvier 1988, cet ouvrage a été conçu pour répondre à plusieurs objectifs essentiels, notamment l'approvisionnement en eau potable des villes d'Oran, Sidi Bel Abbès et, exceptionnellement, Aïn Témouchent, ainsi que l'irrigation des zones agricoles situées en aval du barrage. (Agence Nationale des Barrages et Transferts -ANBT-,2023).

II.3.1 Caractéristiques techniques du barrage

- **Type** : Digue zonée à noyau en argile, avec des recharges en sable et une protection en enrochement.
- **Capacité de la retenue** : 110 millions de mètres cubes (Hm³).
- **Superficie du bassin versant** : 1 137 km², englobant les cours d'eau de l'Oued Isser, l'Oued Sedra et l'Oued Chouly.
- **Superficie de la retenue à la cote normale** : 660 hectares. (Bouanani, A. 2012)
- **Apport moyen annuel** : 18,5 Hm³, avec un taux d'envasement estimé à 0,18 Hm³/an. (Touahir, S., Asri, A., Remini, B., & Saad, H. 2018)

II.4 Impact du barrage sur la zone étudiée après 1988

Le commencement de fonctionnement du barrage El Izdihar a eu des impacts notables sur le régime hydrique de l'Oued Chouly et de ses tributaires. En régulant les écoulements naturels, le barrage a facilité une gestion plus efficace des ressources en eau, garantissant un approvisionnement stable pour les usages domestiques et agricoles. Toutefois, cette régulation a également entraîné une diminution des débits en aval, altérant ainsi les conditions écologiques et hydrologiques de la zone.

Par ailleurs, l'accumulation progressive de sédiments dans la retenue, issue de l'érosion hydrique dans le bassin versant, a réduit la capacité de stockage du barrage. Ce phénomène d'envasement est amplifié par les caractéristiques géomorphologiques du bassin, telles que la pente des terrains, l'occupation du sol, et la nature des formations géologiques — autant de facteurs qui influencent directement la vulnérabilité à l'érosion hydrique (Morris & Fan, 1998).

En définitive, bien que le barrage El Izdihar ait apporté des avantages significatifs en matière d'irrigation et d'approvisionnement en eau, il a également provoqué des modifications sensibles du régime hydrologique de l'Oued Chouly. Ces évolutions appellent une attention particulière afin d'assurer une gestion durable des ressources en eau et de préserver l'équilibre écologique de la région.

II.5 Indicateurs d'Altération Hydrologique

Les Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA) sont des instruments analytiques conçus pour évaluer les effets des activités humaines sur les régimes hydrologiques et guider la gestion durable des ressources en eau. Ils ont été développés pour détecter les modifications affectant les cours d'eau et leur dynamique, tout en fournissant une meilleure compréhension des pressions exercées par les activités anthropiques et les changements climatiques sur les écosystèmes aquatiques (Poff et al., 1997).

L'étude des régimes hydrologiques est indispensable pour identifier les perturbations induites par divers aménagements tels que les barrages, les prélèvements d'eau ou encore les transformations de l'occupation des sols (Poff & Ward, 1989). Grâce aux IHA, il est possible d'analyser ces évolutions à partir de données hydrologiques de long terme, mettant en lumière les tendances liées aux écoulements, aux crues et aux étiages (Richter et al., 1997).

Ces indicateurs reposent sur 67 variables hydrologiques, calculées à partir de données journalières, permettant de caractériser les dynamiques de débit des cours d'eau (Olden & Poff, 2003). Parmi les paramètres clés analysés figurent :

- Les dates et les amplitudes des crues maximales et des étiages annuels, afin de détecter les changements dans la fréquence des événements extrêmes.
- Les moyennes et les fluctuations des débits sur différentes périodes, utiles pour évaluer la stabilité ou la variabilité des régimes hydrologiques.

L'identification des altérations repose sur une approche statistique, permettant de quantifier les modifications liées soit à des événements ponctuels (ex. : mise en eau d'un barrage), soit à des évolutions progressives (ex. : variation des précipitations, surexploitation des ressources) (St-Hilaire et al., 2009).

Les IHA sont regroupés en cinq grandes catégories couvrant 33 paramètres hydrologiques, destinés à mesurer l'impact des perturbations sur les écosystèmes (The Nature Conservancy, 2009). Selon les besoins de l'analyse, les calculs peuvent être effectués en utilisant des statistiques basées sur la moyenne ou la médiane, et en intégrant des moyennes mobiles allant de 1 à 30 jours, afin de suivre les variations de débits à différentes échelles temporelles (Tatar et Regad, 2020).

Grâce à ces indicateurs, il devient possible de détecter les altérations hydrologiques et d'ajuster les stratégies de gestion des ressources en eau dans le but de préserver l'équilibre écologique des milieux aquatiques.

II.5.1 Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)

Les Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA) s'appuient sur 33 paramètres hydrologiques, regroupés en cinq catégories principales consignées dans le tableau II-2.

Tableau II- 2: Les paramètres d'altération hydrologique (IHA)

Groupe de paramètres IHA	Paramètres hydrologiques	Influences de l'écosystème
Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles (Magnitude of monthly water conditions)	12 paramètres Débits médians mensuels et leur variabilité.	<ul style="list-style-type: none"> ○ Impacts sur les habitats aquatiques ○ La croissance des plantes ○ L'accès à l'eau pour la faune terrestre ○ Les conditions physico-chimiques de l'eau (température, oxygène dissous, photosynthèse).
Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes (Magnitude and duration of annual extreme water conditions)	12 paramètres : Analyse des maxima et minima de débit sur des périodes de 1, 3, 7, 30 et 90 jours, ainsi que du nombre de jours à débit nul. -Minima annuels, moyenne sur 1 jour -Minima annuels, moyenne sur 3 jours	<ul style="list-style-type: none"> ○ Équilibre entre espèces ○ Colonisation végétale ○ Organisation des écosystèmes ○ Morphologie des rivières ○ Stress hydrique ○ Déshydratation animale ○ Stress anaérobie ○ Échanges nutritifs ○ Conditions stressantes ○ Répartition des plantes ○ Effets des crues

	<p>-Minima annuels, moyenne sur 7 jours</p> <p>-Minima annuels, moyenne sur 30 jours</p> <p>-Minima annuels, moyenne sur 90 jours</p> <p>-Maxima annuels, moyenne sur 1 jour</p> <p>-Maxima annuels, moyenne sur 3 jours</p> <p>-Maxima annuels, moyenne sur 7 jours</p> <p>-Maxima annuels, moyenne sur 30 jours</p> <p>-Maxima annuels, moyenne sur 90 jours</p> <p>-Nombre de jours à débit nul</p> <p>-Indice d'écoulement de base : rapport du débit minimal sur 7 jours / débit moyen annuel</p>	
<p>Période des conditions hydrologiques extrêmes (Timing of annual extreme water conditions)</p>	<p>2 paramètres : Dates des débits maximum et minimum annuels</p> <p>-Maximum sur 1 jour</p> <p>-Minimum sur 1 jour</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alignement avec les cycles de vie ○ Gestion du stress ○ Accès aux habitats ○ Reproduction des poissons ○ Adaptation comportementale
<p>Fréquence et durée des impulsions hydrologiques (Frequency and duration of high and low pulses)</p>	<p>4 paramètres : Nombre et durée des impulsions hautes et basses de débit au cours de l'année.</p> <p>-Nombre/durée des pulses bas</p> <p>-Seuil des pulses bas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Stress hydrique des plantes ○ Stress anaérobie des plantes ○ Accès aux plaines inondables ○ Échanges de nutriments ○ Minéraux dans le sol ○ Habitats pour les oiseaux ○ Transport des sédiments

	-Nombre/durée des pulses élevés -Seuil des pulses élevés	
Taux et fréquence des variations hydrologiques (Rate and frequency of water condition changes)	3 paramètres -Taux de montée -Taux de descente -Nombre d'inversions hydrologiques	<ul style="list-style-type: none"> ○ Stress hydrique ○ Enclavement des organismes ○ Espèces de transition ○ Résilience des écosystèmes

II.5.2 Evaluation des paramètres non-paramétriques

Dans le tableau donnant les paramètres non-paramétriques, on retrouve des données relatives à la période complète d'analyse, notamment :

- **Facteur de normalisation** : Il s'agit du facteur de normalisation défini dans l'onglet des options d'analyse. Toutes les valeurs de débit en sortie sont divisées par ce facteur (à l'exception du débit moyen non normalisé). Si deux fichiers de données hydrologiques sont comparés, chacun peut avoir un facteur de normalisation différent.
- **Débit moyen annuel** : Moyenne des débits journaliers sur une année, exprimée en m³/s.
- **Débit moyen non normalisé** : Débit moyen brut, sans tenir compte de la surface du bassin versant.
- **Coefficient de variation annuel** : Il est calculé comme l'écart-type de toutes les valeurs journalières divisées par le débit moyen annuel.
- **Prévisibilité du débit** : Ce paramètre varie entre 0 et 1 et se compose de deux éléments
 - **Constance (C)** : mesure de l'invariance temporelle.
 - **Contingence(M)** : mesure de la périodicité du débit.

Un cours d'eau avec un débit très constant aura une prévisibilité dominée par **C**, tandis qu'un cours d'eau avec une variabilité périodique marquée aura une prévisibilité dominée par **M**.
- **Constance du débit / prévisibilité du débit** : $C / (C+M)$.
- **Proportion maximale d'inondations sur une période de 60 jours** : Il s'agit du pourcentage maximum d'années où des crues surviennent sur une période commune de 60 jours. Une crue est définie comme un débit dépassant le seuil de crue. Ce seuil peut être défini dans l'onglet des propriétés de l'analyse.

- **Durée de la saison sans crues** : Nombre de jours consécutifs dans chaque année où le débit est resté en dessous du seuil de crue.

Ces paramètres sont basés sur les travaux de Poff et Ward (1989), tandis que les mesures de prévisibilité, constance et contingence sont dérivées de Colwell (1974). Lorsque l'année hydrologique est raccourcie pour certaines analyses, ces paramètres sont calculés uniquement pour la période considérée.

II.5.3 Analyse des « Range of Variability Approach » (RVA)

Les résultats sont affichés soit pour les périodes avant et après impact, soit pour les deux ensembles de données hydrologiques comparés.

Ces statistiques sont calculées à partir des valeurs annuelles issues du tableau des résumés annuels. De plus, le tableau RVA inclut les seuils de pulsations hautes et basses (dans la section correspondant au Groupe de paramètres #4).

II.5.4 Paramètres hydrologiques

La première partie du tableau fournit des informations détaillées sur chaque paramètre hydrologique.

- **Case 1-2** : Elles affichent la médiane ou la moyenne ainsi que le coefficient de dispersion

$$CD = \frac{(75e\ centile - 25e\ centile)}{50e\ centile} \quad (7)$$

Ou encore le coefficient de variation

$$CV = \frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}} \quad (8)$$

Pour la période avant impact. Le choix de l'indicateur dépend de l'utilisation d'une méthode paramétrique ou non-paramétrique.

- **Case 3-4** : Elles indiquent respectivement la valeur minimale et maximale du paramètre pour la période avant impact.
- **Case 5-8** : Elles reprennent les mêmes informations que les colonnes 1 à 4, mais pour la période après impact.

II.6 Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles

II.6.1 Paramètres du Groupe #1

Le Groupe de Paramètres #1 des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA) comprend 12 paramètres, chacun correspondant au débit médian mensuel de l'année (janvier à décembre). Ces indicateurs permettent de caractériser la magnitude des conditions hydrologiques mensuelles et d'évaluer la variabilité des régimes d'écoulement saisonniers.

II.6.2 Débits médians mensuels (12 paramètres)

Le débit médian mensuel est calculé pour chaque mois sur toute la période étudiée. Il s'agit de la valeur médiane du débit journalier observé au cours d'un mois donné, sur plusieurs années.

- Cet indicateur permet d'identifier les périodes de crue et d'étiage d'un cours d'eau.
- Une diminution des débits médians mensuels peut indiquer un impact des barrages, du changement climatique, de l'évapotranspiration accrue ou des prélèvements d'eau.
- La comparaison des valeurs avant et après une perturbation (ex. construction d'un barrage) permet d'évaluer l'impact des changements anthropiques.

II.6.3 Débits médians mensuels par mois

Débits médians calculés pour chaque mois de l'année, de janvier à décembre.

II.7 Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes

II.7.1 Groupe de Paramètres #2

Ce groupe d'indicateurs hydrologiques permet d'analyser la magnitude et la durée des conditions extrêmes, aussi bien pour les périodes d'étiage (débits minimaux) que pour les crues (débits maximaux). Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les fluctuations hydrologiques d'un cours d'eau et l'impact des perturbations naturelles et anthropiques sur son régime d'écoulement.

II.7.2 Paramètres des minima hydrologiques (étiages)

Ces indicateurs permettent d'évaluer les débits les plus bas observés sur différentes durées, ce qui est essentiel pour analyser les périodes de sécheresse et leur intensité.

- Minimum sur 1 jour (*1-day minimum*) : Le plus faible débit journalier observé chaque année.
- Minimum sur 3 jours (*3-day minimum*) : Moyenne des trois jours consécutifs avec les débits les plus faibles.
- Minimum sur 7 jours (*7-day minimum*) : Moyenne des sept jours consécutifs avec les plus faibles débits.

- Minimum sur 30 jours (*30-day minimum*) : Moyenne des trente jours consécutifs avec les plus faibles débits.
- Minimum sur 90 jours (*90-day minimum*) : Moyenne des quatre-vingt-dix jours consécutifs avec les plus faibles débits.

II.7.3 Paramètres des maxima hydrologiques (crues)

Ces indicateurs permettent d'identifier les plus forts débits enregistrés sur différentes périodes, ce qui est essentiel pour étudier les crues et leur intensité.

- Maximum sur 1 jour (*1-day maximum*) : Le débit journalier le plus élevé observé chaque année.
- Maximum sur 3 jours (*3-day maximum*) : Moyenne des trois jours consécutifs avec les débits les plus élevés.
- Maximum sur 7 jours (*7-day maximum*) : Moyenne des sept jours consécutifs avec les plus forts débits.
- Maximum sur 30 jours (*30-day maximum*) : Moyenne des trente jours consécutifs avec les plus forts débits.
- Maximum sur 90 jours (*90-day maximum*) : Moyenne des quatre-vingt-dix jours consécutifs avec les plus forts débits.

II.7.4 Nombre de jours à débit nul (*Number of zero-flow days*)

Nombre de jours dans l'année où le débit du cours d'eau est nul. Indique la fréquence des périodes de tarissement, particulièrement en contexte de sécheresse ou de régulation par des barrages.

II.7.5 Indice d'écoulement de base (*Base flow index*)

Rapport entre le débit minimum sur 7 jours et le débit moyen annuel. Permet d'évaluer la contribution des eaux souterraines à l'écoulement des cours d'eau et la stabilité du régime hydrologique.

II.8 Période des conditions hydrologiques extrêmes

II.8.1 Groupe de Paramètres #3

Ce groupe d'indicateurs hydrologiques permet d'analyser le moment de survenue des conditions extrêmes, qu'il s'agisse des étiages (débits minimaux) ou des crues (débits maximaux). Ces informations sont essentielles pour comprendre la dynamique saisonnière des écoulements et leur variabilité interannuelle.

II.8.2 Date du débit minimal (*Date of minimum*)

Cet indicateur correspond à la date à laquelle le débit le plus bas de l'année est observé.

Il permet d'identifier les périodes critiques d'étiage, qui peuvent être influencées par des sécheresses prolongées, des prélèvements excessifs ou des changements climatiques.

Une modification dans la date des étiages peut signaler des altérations du régime hydrologique, par exemple à cause de l'effet de retenues d'eau ou d'un changement dans la répartition des précipitations.

II.8.3 Date du débit maximal (*Date of maximum*)

Il représente la date à laquelle le débit maximal annuel est enregistré.

Permet de suivre l'évolution des périodes de crue, qui peuvent être influencées par les précipitations, la fonte des neiges ou des lâchers d'eau provenant de barrages.

Une variation dans la date des crues peut indiquer un changement climatique ou une modification des régimes hydrologiques dus à des infrastructures hydrauliques.

II.9 Fréquence et durée des impulsions hydrologiques

II.9.1 Groupe de Paramètres #4

Ce groupe d'indicateurs hydrologiques permet d'analyser la fréquence et la durée des impulsions hydrologiques, c'est-à-dire les épisodes de débits anormalement bas (pulses bas) et débits anormalement élevés (pulses hauts). Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les impacts des fluctuations hydrologiques sur les écosystèmes aquatiques et la disponibilité des ressources en eau.

II.9.2 Nombre d'impulsions de faible débit (*Low pulse count*)

- Il correspond au nombre total de périodes dans l'année où le débit descend en dessous d'un seuil défini comme « faible ».
- Une augmentation de ces événements peut indiquer une tendance à l'assèchement du cours d'eau, souvent liée à une diminution des précipitations ou à des prélèvements excessifs.
- Une diminution peut résulter de la régulation par un barrage, qui stabilise le débit en aval.

II.9.3 Durée des impulsions de faible débit (*Low pulse duration*)

- Mesure la durée moyenne (en jours) de chaque période où le débit est inférieur au seuil bas.
- Une durée prolongée peut indiquer un étiage sévère ou un déficit hydrique chronique.
- Une réduction de cette durée peut être observée dans les bassins versants où des lâchers d'eau réguliers sont effectués depuis un barrage.

II.9.4 Nombre d'impulsions de fort débit (*High pulse count*)

- Il correspond au nombre total de périodes où le débit dépasse un seuil défini comme « élevé ».
- Une augmentation de ces événements peut être causée par des précipitations plus intenses, des crues soudaines ou des lâchers d'eau de barrages.
- Une diminution peut signaler une altération du régime hydrologique, notamment en raison de la rétention d'eau en amont.

II.9.5 Durée des impulsions de fort débit (*High pulse duration*)

- Mesure la durée moyenne (en jours) des épisodes où le débit est supérieur au seuil élevé.
- Une durée prolongée peut être associée à des périodes de crue prolongées, souvent causées par des pluies excessives ou une fonte des neiges importante.
- Une réduction de la durée peut indiquer une régulation accrue du débit par des aménagements hydrauliques.

II.9.6 Seuil des impulsions de faible débit (*The low pulse threshold*)

- C'est la valeur limite de débit en dessous de laquelle une impulsion de faible débit est identifiée.
- Il peut être défini en fonction du débit moyen annuel, par exemple un pourcentage du débit de base.
- Ce seuil varie selon les caractéristiques hydrologiques du bassin étudié.

II.9.7 Seuil des impulsions de fort débit (*The high pulse threshold*)

- C'est la valeur limite de débit au-dessus de laquelle une impulsion de fort débit est identifiée.
- Il peut être fixé selon un seuil statistique (ex. : 75e ou 90e percentile des débits journaliers).

II.10 Taux et fréquence des variations hydrologiques

II.10.1 Groupe de Paramètres #5

Ce groupe d'indicateurs hydrologiques permet d'analyser la rapidité et la fréquence des variations du débit d'un cours d'eau, en évaluant les phases d'augmentation et de diminution des écoulements ainsi que les inversions de tendance hydrologique

II.10.2 Taux de montée du débit (*Rise rates*)

Cet indicateur mesure la vitesse moyenne d'augmentation du débit d'un jour à l'autre (exprimée en m³/s par jour). Un taux de montée élevé indique une augmentation rapide du débit, souvent associée à des crues soudaines, des précipitations intenses ou des lâchers d'eau depuis un barrage. Un taux plus faible peut être observé dans des bassins où les précipitations sont progressivement absorbées par le sol ou retenues par des infrastructures hydrauliques.

II.10.3 Taux de descente du débit (*Fall rates*)

Il représente la vitesse moyenne de diminution du débit d'un jour à l'autre (exprimée en m³/s par jour). Un taux de descente élevé peut indiquer une vidange rapide d'un cours d'eau, souvent liée à une réduction soudaine des précipitations ou à un arrêt des lâchers d'eau en amont. Un taux plus faible peut être observé dans des bassins où l'écoulement de base est soutenu par des eaux souterraines ou des retenues d'eau naturelles.

II.10.4 Nombre d'inversions hydrologiques (*Number of hydrologic reversals*)

Cet indicateur compte le nombre total de changements de tendance du débit dans l'année, c'est-à-dire le passage d'une phase de montée à une phase de descente et inversement. Un nombre élevé d'inversions indique un régime hydrologique instable, avec des fluctuations fréquentes des écoulements. Un nombre faible signifie que le régime hydrologique est plus stable, avec des transitions plus progressives entre les phases d'augmentation et de diminution du débit.

II.11 Indicateurs de Magnitude et de Variabilité des Apports Hydrologiques

Les Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA) permettent d'évaluer les modifications des régimes d'écoulement causées par les activités humaines et les changements climatiques. Parmi eux, plusieurs paramètres sont essentiels pour analyser la magnitude et la variabilité des apports en eau dans les cours d'eau altérés et naturels.

II.11.1 Magnitude des apports annuels (IHA1)

Cet indicateur compare la moyenne annuelle des apports dans le régime altéré (QAA) à celle du régime naturel (QAN).

Il est calculé selon la formule :

$$IHA1 = QAA / QAN \quad (9)$$

- **IHA1** > 1 → augmentation des apports annuels, suggérant une hausse du débit moyen.
- **IHA1** < 1 → diminution des apports annuels, indiquant une réduction des ressources en eau disponibles.

II.11.2 Magnitude des apports mensuels (IHA2)

Cet indicateur compare la moyenne mensuelle des débits dans le régime altéré (QMA) à celle du régime naturel (QMN).

Il est défini par la relation :

$$IHA2 = QMA / QMN \quad (10)$$

- **IHA2** > 1 → augmentation des débits mensuels moyens, pouvant résulter de pluies plus abondantes ou d'aménagements hydrauliques.
- **IHA2** < 1 → diminution des débits mensuels moyens, traduisant une baisse des précipitations ou une surexploitation des ressources en eau.

II.11.3 Variabilité normale des apports (IHA3)

Cet indicateur mesure la dispersion des débits en comparant la différence entre le 10^e percentile (Q10) et le 90^e percentile (Q90) des apports hydrologiques dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA3 = \frac{(Q10 - Q90)_{ALT}}{(Q10 - Q90)_{NAT}} \quad (11)$$

- **IHA3 > 1** → augmentation de la variabilité des débits, signalant une alternance plus marquée entre hautes eaux et basses eaux.
- **IHA3 < 1** → diminution de la variabilité des débits, indiquant une régularisation accrue des écoulements, souvent due à la présence de barrages ou de retenues d'eau.

II.11.4 Variabilité extrême des apports (IHA4)

Cet indicateur évalue les fluctuations extrêmes des débits en comparant la différence entre les débits mensuels maximal (QmaxT) et minimal (QminT) dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA4 = \frac{(Q_{maxT} - Q_{minT})_{ALT}}{(Q_{maxT} - Q_{minT})_{NAT}} \quad (12)$$

- **IHA4 > 1** → accentuation des variations extrêmes des débits mensuels, pouvant être causée par des phénomènes météorologiques intenses ou des régulations artificielles excessives.
- **IHA4 < 1** → atténuation des fluctuations extrêmes, souvent liée à des aménagements hydrauliques réduisant l'impact des crues et des étiages.

II.11.5 Saisonnalité maximale (IHA5)

Cet indicateur évalue la régularité des crues maximales en comparant la différence entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA5 = 1 - \frac{Gapmax}{6} \quad (13)$$

Où Gapmax est la moyenne des écarts entre les séries mensuelles maximales du régime altéré et du régime naturel pour chaque année.

- **IHA5 proche de ≈ 1** → faible altération de la saisonnalité des crues maximales, indiquant une préservation du régime naturel.
- **IHA5 proche de ≈ 0** → forte altération de la saisonnalité, traduisant une perturbation importante du cycle hydrologique.

II.11.6 Saisonnalité minimale (IHA6)

Cet indicateur mesure la régularité des étiages en comparant la différence entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA6 = 1 - \frac{Gapmin}{6} \quad (14)$$

Où **Gapmin** est la moyenne des écarts entre les séries mensuelles minimales du régime altéré et du régime naturel pour chaque année.

- **IHA6 proche de ≈ 1** → stabilité des débits minimaux dans le temps, préservant le cycle hydrologique naturel.
- **IHA6 proche de ≈ 0** → forte variabilité des débits minimaux, pouvant affecter la disponibilité de l'eau en période d'étiage.

II.11.7 Magnitude des crues normales (IHA7)

Cet indicateur compare l'intensité des crues normales entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA7 = \frac{(Q5)^{NAT}}{(Q5)^{ALT}} \quad (15)$$

Où **Q5** représente le 5^e centile des apports en eau dans les régimes altéré et naturel.

- **IHA7 > 1** → augmentation de la magnitude des crues normales sous l'effet d'interventions anthropiques ou climatiques.
- **IHA7 < 1** → réduction de l'intensité des crues normales, pouvant résulter d'une régulation excessive des écoulements.

II.11.8 Variabilité des crues normales (IHA8)

Cet indicateur évalue la variabilité des crues normales en comparant le coefficient de variation des apports en eau dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA8 = \frac{(Cv5)^{NAT}}{(Cv5)^{ALT}} \quad (16)$$

Où **Cv5** est le coefficient de variation (m/s) des séries de crues supérieures à Q5 dans les régimes altéré et naturel.

- **IHA8 > 1** → augmentation de la variabilité des crues normales, indiquant une plus grande imprévisibilité du régime hydrologique.
- **IHA8 < 1** → diminution de la variabilité des crues normales, pouvant être due à une régulation excessive des écoulements.

II.11.9 Saisonnalité des crues (IHA9)

Cet indicateur mesure la régularité saisonnière des crues en comparant le nombre d'années où les débits mensuels moyens dépassent le seuil des crues normales dans les régimes naturel et altéré :

$$IHA9 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \max(0, 5 - |ifldNAT, m - ifldALT, m|) \quad (17)$$

Où :

- **m** représente le mois de l'année,

- $i_{fldNAT,m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MN} du mois m est supérieur au débit de crue normal Q_5 dans le régime naturel,
- $i_{fldALT,m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MA} du mois m est supérieur à Q_5 dans le régime altéré.
- **IHA9 proche de ≈ 1** → maintien de la saisonnalité des crues naturelles.
- **IHA9 proche de ≈ 0** → perturbation importante de la saisonnalité des crues.

II.11.10 Magnitude des sécheresses normales (IHA10)

Cet indicateur compare l'intensité des sécheresses normales entre les régimes naturel et altéré :

$$IHA10 = \frac{(Q_{95})_{NAT}}{(Q_{95})_{ALT}} \quad (18)$$

Où Q_{95} représente le 95^e centile des apports en eau dans les régimes altéré et naturel.

- **IHA10 > 1** → augmentation des débits en période de sécheresse, indiquant une possible gestion active du flux d'eau.
- **IHA10 < 1** → réduction des débits en période de sécheresse, pouvant signaler une intensification des déficits hydriques.

II.11.11 Variabilité des sécheresses normales (IHA11)

Cet indicateur évalue la fluctuation des sécheresses normales en comparant le coefficient de variation des apports d'eau en période de sécheresse :

$$IHA11 = \frac{(Cv_{95})_{NAT}}{(Cv_{95})_{ALT}} \quad (19)$$

Où Cv_{95} est le coefficient de variation (m/s) des séries de débits inférieurs à Q_{95} dans les régimes altéré et naturel.

- **IHA11 > 1** → augmentation de la variabilité des sécheresses normales, suggérant une plus grande imprévisibilité du régime hydrologique.
- **IHA11 < 1** → diminution de la variabilité des sécheresses normales, pouvant être due à des mesures de stabilisation des écoulements.

II.11.12 Saisonnalité des sécheresses (IHA12)

Cet indicateur mesure la régularité saisonnière des sécheresses en comparant le nombre d'années où les débits mensuels moyens tombent sous le seuil des sécheresses normales dans les régimes naturel et altéré :

$$IHA12 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \max(0, 5 - |idr_{NAT, m} - idr_{ALT, m}|) \quad (20)$$

Où :

- **m** représente le mois de l'année,
- **i_{drNAT,m}** est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MN} du mois m est inférieur au débit de sécheresse normal Q_{95} dans le régime naturel,
- **i_{drALT,m}** est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MA} du mois m est inférieur à Q_{95} dans le régime altéré.
- **IHA12 proche de ≈ 1** → maintien de la saisonnalité des sécheresses naturelles.
- **IHA12 proche de ≈ 0** → perturbation importante de la saisonnalité des sécheresses.

II.12 Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA)

Un indicateur global d'altération hydrologique (GIHA) est calculé comme la moyenne des douze indicateurs IHA :

$$GIHA = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} IHA_i \quad (21)$$

Où IHA_i représente l'indicateur d'altération hydrologique pour chaque paramètre i .

II.13 L'échelle des IHA

La détermination du degré d'altération hydrologique dans les systèmes d'eau repose sur l'analyse des statistiques interannuelles entre les régimes d'écoulement naturels et modifiés. Les indicateurs utilisés dans cette étude sont adaptés de la méthodologie développée par (Santa-María & Yuste, 2010). En raison de la nature des données disponibles, il n'est pas possible d'utiliser tous les paramètres d'origine. Il est donc nécessaire de sélectionner ceux qui sont adaptables à une échelle mensuelle.

L'auteur de (Ortín León, 2017) a adapté un ensemble de 12 indicateurs, estimés à partir de leurs valeurs moyennes sur l'ensemble de la série temporelle. Ces indicateurs, détaillés en Annexe A, sont classés en trois catégories :

- **Valeurs normales** ($IHA1$ - $IHA6$).
- **Valeurs extrêmes maximales** ($IHA7$ - $IHA9$).
- **Valeurs extrêmes minimales** ($IHA10$ - $IHA12$).

De plus, pour chacune de ces catégories, trois aspects clés ont été sélectionnés en raison de leur importance environnementale :

1. **Magnitude** ($IHA1$, $IHA2$, $IHA7$ et $IHA10$) : Elle détermine la disponibilité générale de l'eau dans l'écosystème.
2. **Fréquence d'occurrence d'un événement dans un intervalle de temps donné** ($IHA3$, $IHA4$, $IHA8$ et $IHA11$) : Cet indicateur est représentatif de la variabilité du régime

hydrologique, influençant les dynamiques géomorphologiques et écologiques, et par conséquent la diversité des écosystèmes aquatiques.

- 3. Saisonnalité (IHA5, IHA6, IHA9 et IHA12) :** Il s'agit de la régularité avec laquelle un événement se produit à une période donnée de l'année. Cet aspect est étroitement lié aux cycles de vie des espèces.

Les douze IHA analysés sont déterminés pour les régimes naturels et modifiés dans toutes les sections du réseau fluvial prises en compte pour la gestion du bassin. Une moyenne pondérée de chaque paramètre est ensuite calculée en fonction du débit d'écoulement dans chaque section de la rivière, permettant ainsi de définir une valeur d'indicateur globale pour l'ensemble du bassin versant.

II.1 Échelle d'évaluation des altérations hydrologiques

Les valeurs des indicateurs varient entre 0 et 1, où :

- **0** indique une altération totale du régime hydrologique.
- **1** correspond à un état non altéré.
- Si la valeur d'un indicateur est supérieure à 1, elle est remplacée par son inverse.

Tableau II- 3: Niveaux d'altération hydrologique en fonction de la valeur de l'indicateur IHA

Niveau d'altération	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Valeur de l'IHA	$1 > IHA > 0.8$	$0.8 > IHA > 0.6$	$0.6 > IHA > 0.4$	$0.4 > IHA > 0.2$	$0.2 > IHA > 0$
Etat	État exceptionnellement bon	Bon état	État modéré	État médiocre	Mauvais état

Chapitre III : Résultats

III.1 Détermination de la date de la rupture des débits

Les résultats des méthodes de rupture de stationnarité adoptées dans ce travail sont consignés dans le tableau ci-dessous. Pour la méthode des cumuls, la détermination est graphique (Figure).

Tableau III- 1: Les résultats des méthodes de rupture

Test	Année de rupture	Avant rupture		Après rupture		Déficit	Observations
		Moy	Ecart-type	Moy	Ecart-type		
Pettitt	1980-81	0,353	0,144	0,144	0,145	-0,592	Rupture probable
Hubert	1976-77	0,377	0,141	0,155	0,173	-0,222	Rupture franche
Cumuls	1976-77	7,368	4,42	19,42	2,44	+12,05	Saut cumulé observé
Rang	-	-	-	-	-	-	Pas de rupture

Le graphique montre une rupture nette autour des années 1976-77. Avant cette date, la pente cumulée est plus faible (0,2079), reflétant des débits annuels moins importants. Après la rupture, la pente augmente fortement à 0,4364, traduisant un changement de régime avec des débits annuels plus élevés et plus réguliers.

Les deux régressions linéaires présentent des coefficients de détermination élevés ($R^2 > 0,97$), soulignant la stabilité des tendances dans chaque période.

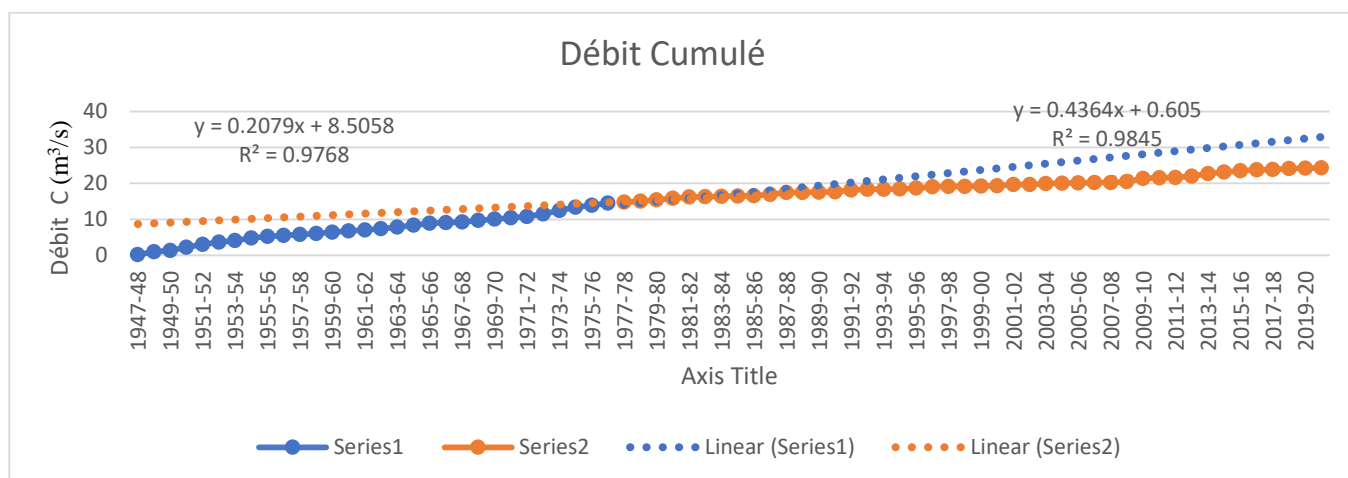


Figure III- 1: Méthode des cumuls des débits annuels

Pour la suite de l'étude, la date de rupture est considérée durant l'année 1976-77

III.2 Effet changement climatique [1947-1976 / 1977-1988]

III.2.1 Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles :

III.2.1.1 Groupe de Paramètres #1

L'étude des débits médians mensuels et de leur variabilité pour le bassin versant de l'Oued Chouly sur la période 1947-2020 révèle des changements significatifs dans le régime hydrologique de la région (Tableau III-2).

L'analyse des débits mensuels avant (1947–1976) et après impact (1978–1988), combinée aux résultats de la méthode RVA, permet d'évaluer les effets du changement climatique sur le régime hydrologique de l'Oued Chouly.

III.2.1.2 Diminution généralisée des débits mensuels

- On observe selon le **Tableau III- 2** une baisse marquée des médianes mensuelles pour la majorité des mois après 1977. Par exemple :
 - Janvier : de 0,36 m³/s à 0,15 m³/s
 - Mai : de 0,49 m³/s à 0,085 m³/s
 - Août : de 0,10 m³/s à 0,035 m³/s
- Cette baisse est particulièrement importante entre avril et août, ce qui accentue les périodes d'étiage prolongées.
- Le coefficient de dispersion (C.D) reste élevé certains mois, notamment en février (3,355) après impact, traduisant une variabilité accrue due à une régulation irrégulière ou à des événements ponctuels.

Tableau III- 2: Débits médians mensuels et de leur variabilité #1

Paramètres#1	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-1988			
	Médians	CD	Min	Max	Médians	CD	Min	Max
Jan	0,36	1,216	0,109	1,884	0,15	1,133	0,1	1,05
Fev	0,48	0,8958	0,139	1,74	0,2831	3,355	0,1	3,34
Mars	0,42	1,214	0,124	2,46	0,432	1,769	0,045	1,05
Avril	0,49	1,163	0,14	1,95	0,17	1,518	0,045	0,459
Mai	0,49	1,122	0,094	1,88	0,085	1,165	0,035	0,23
Juin	0,25	0,68	0,064	0,63	0,057	0,7018	0,027	0,132
Juill	0,16	0,4	0,0556	0,53	0,045	0,4889	0,019	0,1
Août	0,1	0,66	0,03	0,26	0,035	0,5143	0,019	0,071
Sep	0,12	0,5267	0,03	0,33	0,035	0,2286	0,027	0,085
Oct	0,14	0,7143	0,064	0,48	0,045	0,4889	0,027	0,1
Nov	0,17	0,5588	0,055	0,61	0,071	0,7746	0,035	0,21
Déc	0,24	0,7917	0,079	0,85	0,1	0,99	0,045	0,21

III.2.1.3 Altération hydrologique mensuelle (RVA)

La méthode RVA révèle des altérations fortes à extrêmes (voir tableau III-3) :

- Altérations extrêmes (-1) sont observées pour février, mai à décembre, traduisant une rupture complète par rapport aux limites naturelles de variabilité.
- Les altérations sont modérées à fortes en janvier et mars (-0,2314), et avril (-0,5303).
- Ces résultats indiquent que la majorité des mois ont subi une modification radicale du régime hydrologique, en particulier pendant les saisons de transition (printemps et automne).

Tableau III- 3: Altération hydrologique (RVA)1.1

Paramètres#1	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Jan	0,249	0,5744	-0,2314
Fev	0,41	0,6972	-1
Mars	0,388	0,7564	-0,2314
Avril	0,3505	0,72	-0,5303
Mai	0,2508	0,6696	-1
Juin	0,17	0,2919	-1
Juill	0,1382	0,17	-1
Août	0,0828	0,1389	-1
Sep	0,1	0,1279	-1
Oct	0,1055	0,1644	-1
Nov	0,1635	0,1931	-1
Déc	0,2212	0,28	-1

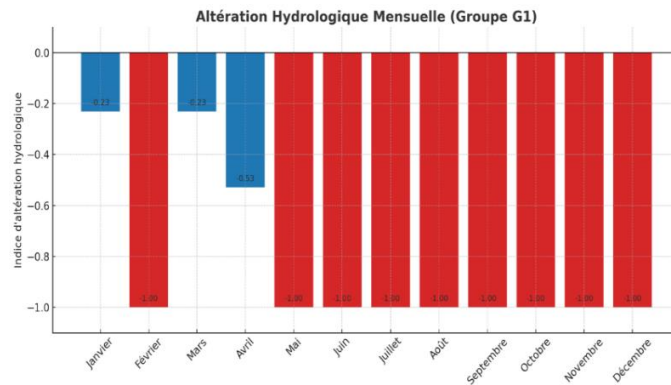


Figure III- 2: Altération hydrologique

III.2.2 Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact

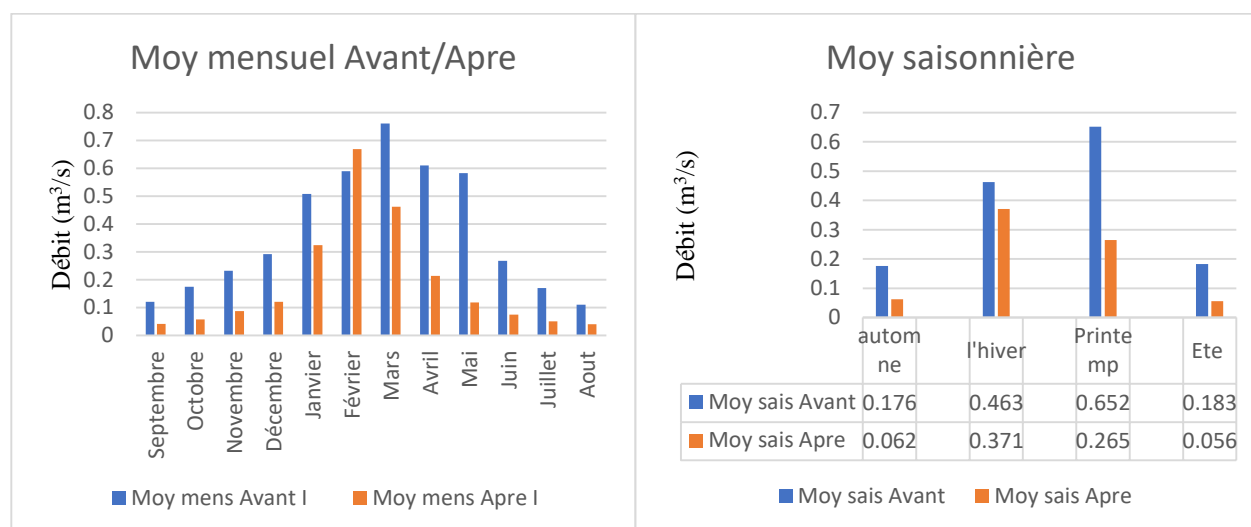


Figure III- 3: Variation saisonnière et mensuelle des débits

L'analyse des débits moyens mensuels et saisonniers met en évidence une baisse générale du régime hydrologique après l'impact, attribuée au changement climatique.

III.2.2.1 Débits mensuels

Le premier graphique montre que les débits mensuels moyens ont diminué pour presque tous les mois de l'année après 1977 :

- La baisse est marquée d'octobre à mai, période habituellement active en écoulement.
- Les mois de février et mars restent les plus productifs, mais les débits sont significativement réduits après l'impact.
- Les mois d'été (juin à août) restent très faibles, accentuant les périodes d'étiage.

III.2.2.2 Débits saisonniers

Le deuxième graphique illustre une diminution notable des débits moyens pour toutes les saisons :

- En printemps, les débits passent de 0,65 à 0,27 m³/s, soit une chute de près de 59 %.
- En automne et été, la baisse est encore plus sévère (jusqu'à 66 % en automne).
- Seule la saison hivernale présente une réduction plus modérée, de 0,46 à 0,37 m³/s.

Ces baisses saisonnières et mensuelles confirment une modification profonde du régime hydrologique, avec une réduction des apports en eau et une accentuation des périodes de faible débit. Cela compromet la stabilité écologique et la disponibilité en eau sur l'ensemble du bassin.

III.2.3 Échelle annuelle

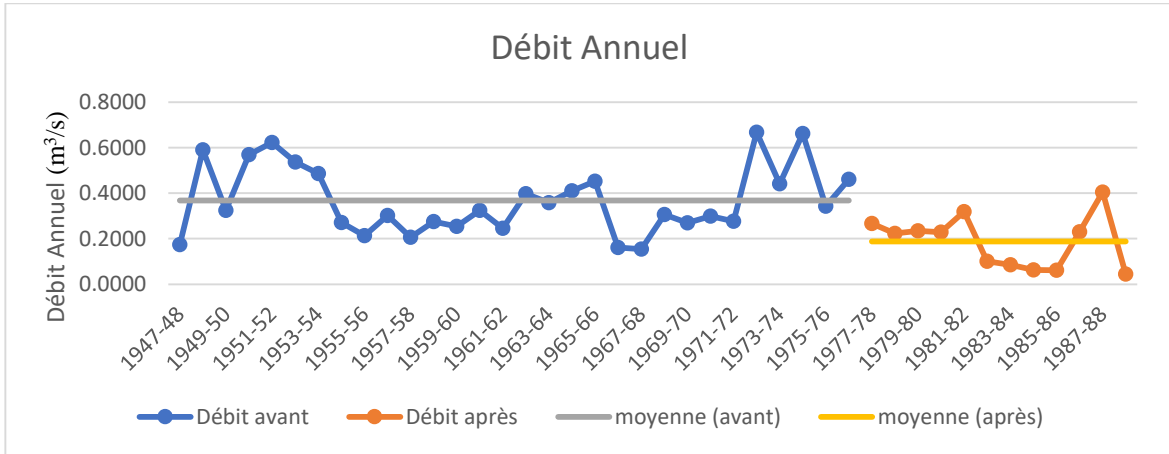


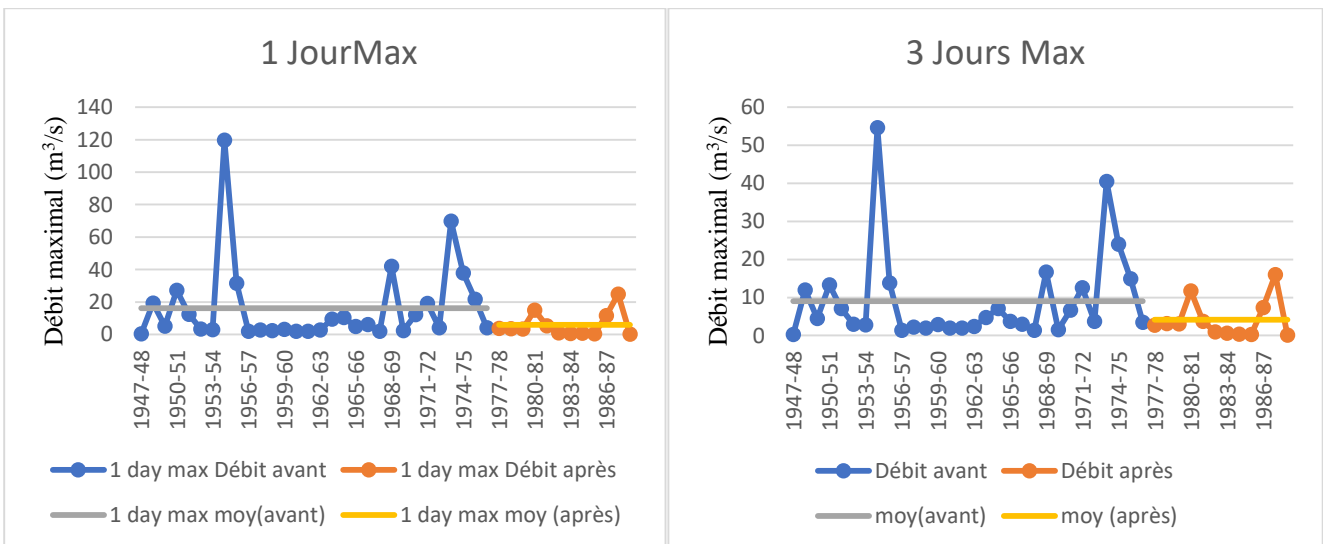
Figure III- 4: L'évolution du débit annuel

Le graphique montre l'évolution du débit annuel de l'Oued Chouly entre 1947 et 1988.

Avant 1977, les débits annuels présentent une forte variabilité, avec des valeurs atteignant jusqu'à 0,7 m³/s et une moyenne autour de 0,35 m³/s. Après 1977, on observe une baisse marquée des débits annuels, avec des valeurs majoritairement inférieures à 0,2 m³/s et une moyenne stabilisée autour de 0,15 m³/s. La rupture nette entre les deux périodes est bien visible, avec un changement de tendance à partir de la fin des années 1970.

III.2.4 Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes :

III.2.4.1 Débits maximaux



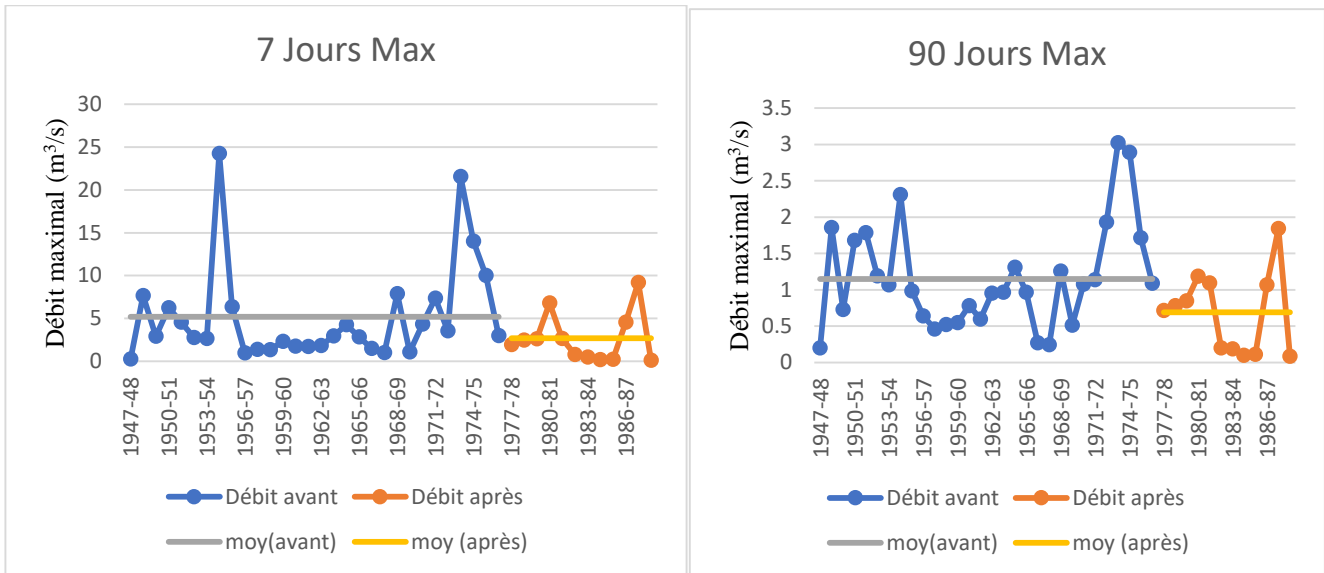
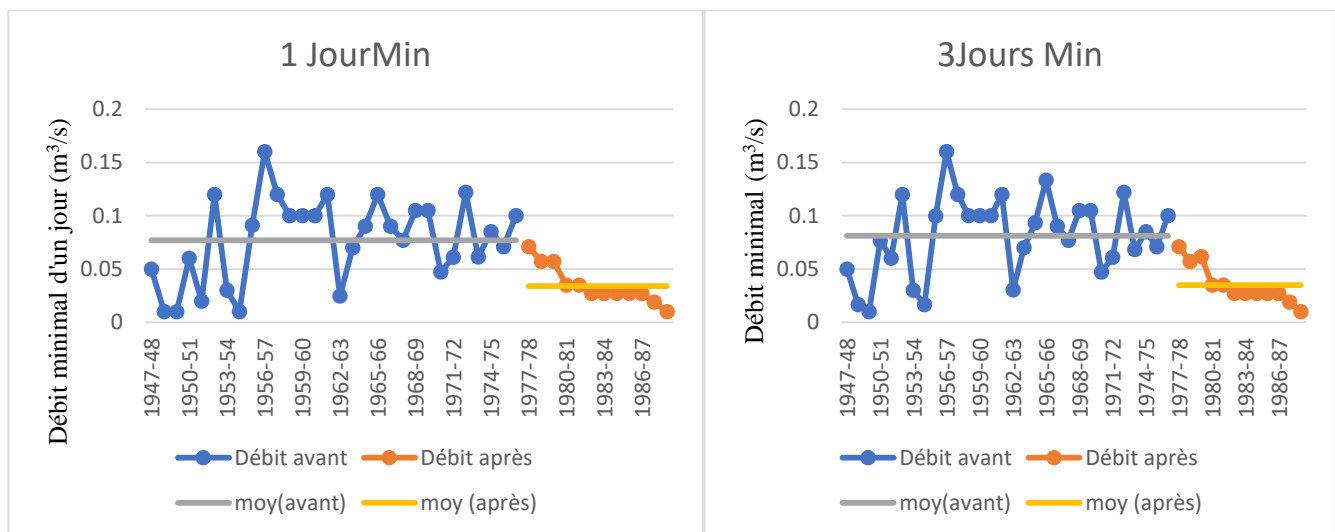


Figure III- 5: Évolution des débits maximaux (1, 3, 7, 90 jours)

Les graphiques montrent clairement une baisse généralisée des débits maximaux après 1977, quelle que soit la durée considérée (Figure III- 6).

- **1 Jour Max** : Avant l’impact, on observe plusieurs crues extrêmes, notamment en 1954-55 avec un pic exceptionnel de plus de 120 m³/s. Après 1977, les débits journaliers maximaux sont nettement atténués, ne dépassant que rarement 20 m³/s.
- **3 Jours Max** : La période avant 1977 présente des pics atteignant plus de 50 m³/s, tandis qu’après, les valeurs restent généralement sous 15 m³/s. La transition est nette et traduit une réduction des crues modérées.
- **7 Jours Max** : Les crues prolongées étaient plus intenses avant 1977, avec des valeurs pouvant dépasser 25 m³/s. Après l’impact, les crues sur 7 jours sont beaucoup plus faibles, souvent inférieures à 10 m³/s.
- **90 Jours Max** : Avant l’impact, les débits moyens sur 90 jours présentent une grande variabilité, avec des valeurs allant jusqu’à 3 m³/s. Après 1977, les débits sont moins fluctuants, mais aussi moins élevés, généralement en dessous de 1,5 m³/s.

III.2.4.2 Débits minimaux



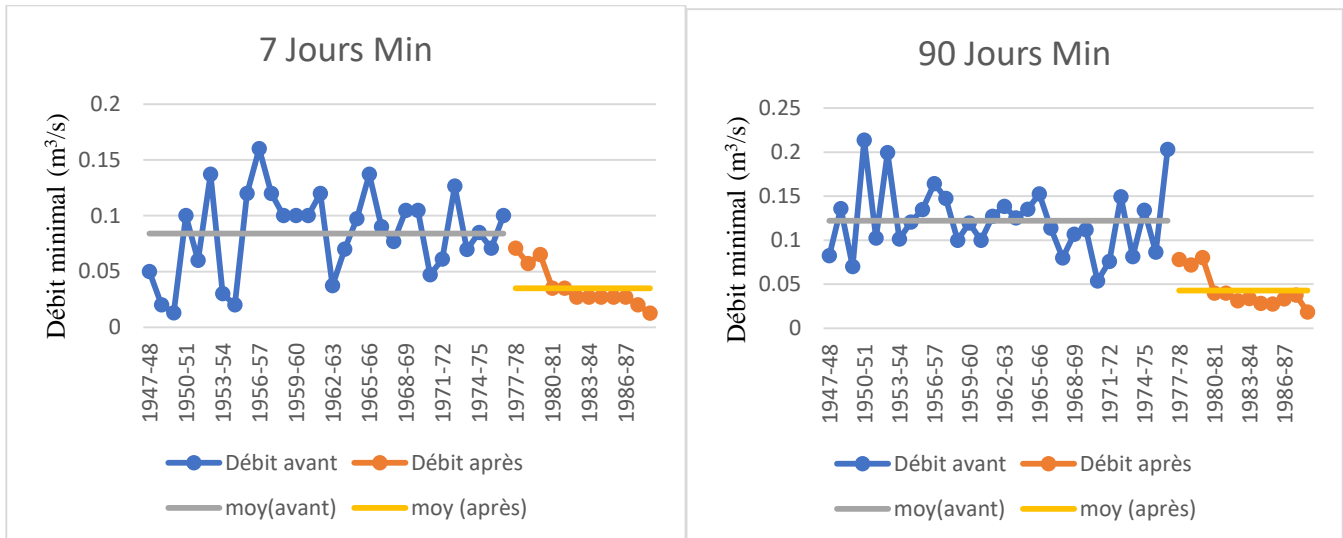


Figure III- 7: Évolution des débits minimaux (1, 3, 7, 90 jours)

Les quatre graphiques montrent une baisse nette et progressive des débits minimaux après 1977, avec des valeurs nettement plus faibles qu’avant.

- **1 Jour Min** : Avant 1977, les débits minimaux journaliers oscillent entre 0,02 et 0,16 m³/s, avec une moyenne relativement stable. Après 1977, les valeurs chutent progressivement, atteignant moins de 0,02 m³/s à la fin des années 1980.
- **3 Jours Min** : Les débits minimaux sur 3 jours suivent une tendance similaire à celle du débit journalier, avec des valeurs plus élevées avant 1977 (jusqu’à 0,16 m³/s) et une forte chute après. Les valeurs post-1977 restent sous 0,03 m³/s, avec une moyenne nettement réduite.
- **7 Jours Min** : Avant l’impact, les débits sont généralement supérieurs à 0,07 m³/s, avec plusieurs années autour de 0,12–0,16 m³/s. Après 1977, la moyenne chute, et les valeurs se stabilisent entre 0,015 et 0,04 m³/s.
- **90 Jours Min** : Les débits minimaux sur 90 jours montrent une forte variabilité avant 1977, avec des pics dépassant 0,2 m³/s. Après l’impact, les valeurs se stabilisent autour de 0,03–0,05 m³/s, avec très peu de variation.

D’après les tableaux (Tableau III- 4) (Tableau III-5), qui présentent respectivement les débits médians maximaux et minimaux ainsi que leur variabilité, notamment à travers l’indice RVA

Les débits maximaux montrent une réduction notable sur toutes les périodes étudiées (1, 3, 7, 30, 90 jours). Par exemple, la médiane du débit sur 1 jour passe de 5,05 à 3,677 m³/s, et celle sur 90 jours de 1,027 à 0,4438 m³/s.

Les valeurs extrêmes diminuent également fortement, avec une division par deux des débits maximaux sur 1 jour (119,8 à 64,82 m³/s).

Le coefficient de dispersion baisse pour les crues courtes, mais augmente légèrement pour les périodes longues, traduisant une crue moins violente mais moins prévisible.

Selon le tableau relatif au RVA, ces baisses se confirment :

- L'indice d'altération hydrologique est quasi nul pour 1 jour max (0,02273), mais modérément négatif pour les autres (jusqu'à -0,3182), indiquant une atténuation progressive des crues.

Les débits minimaux

Les médianes chutent drastiquement. Pour le 1 jour Min, de 0,0875 à 0,027 m³/s, et pour 90 jours, de 0,1201 à 0,02878 m³/s.

Les valeurs extrêmes diminuent jusqu'à des niveaux critiques (0,003 m³/s en 1 jour après impact).

- Les indices RVA des minima sont très négatifs (de -0,9318 à -1), ce qui révèle une altération sévère à totale des débits d'étiage.

Tableau III- 5: Débits médians MAX/MIN et de leur variabilité #2

Paramètres#2	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-1988			
	Médianes	C.D	Minimum	Maximum	Médianes	C.D	Minimum	Maximum
1 jour Max	5,05	3,426	0,39	119,8	3,677	2,874	0,132	64,82
3 joursMax	3,762	2,813	0,31	54,63	2,896	2,604	0,1147	30,53
7 jours Max	2,941	1,682	0,2643	24,25	1,845	2,701	0,1063	14,52
30 joursMax	1,844	0,832	0,2	6,809	0,8817	2,096	0,09653	5,083
90 joursMax	1,027	1,073	0,2	3,027	0,4438	2,043	0,07432	2,839
1 jour Min	0,0875	0,6343	0,01	0,16	0,027	0,2963	0,003	0,071
3 joursMin	0,0875	0,5406	0,01	0,16	0,027	0,3333	0,004333	0,071
7 jours Min	0,09357	0,5461	0,01286	0,16	0,027	0,2963	0,006857	0,071
30 jours Min	0,1	0,5485	0,029	0,1747	0,027	0,3247	0,009333	0,0757
90 jours Min	0,1201	0,3684	0,05364	0,2136	0,02878	0,3031	0,009633	0,08018

Tableau III- 6: Altération hydrologique (RVA)1.2

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
1 jour Max	3,048	12,37	0,02273
3 jours Max	2,834	7,111	-0,3182
7 jours Max	1,951	4,522	-0,3182
30 jours Max	1,258	2,395	-0,1818
90 jours Max	0,743	1,244	-0,1818
1 jour Min	0,06105	0,1	-0,9432
3 jours Min	0,06867	0,1	-0,9432
7 jours Min	0,06987	0,1	-0,938
30 jours Min	0,07292	0,1061	-0,9318
90 jours Min	0,1016	0,1351	-1

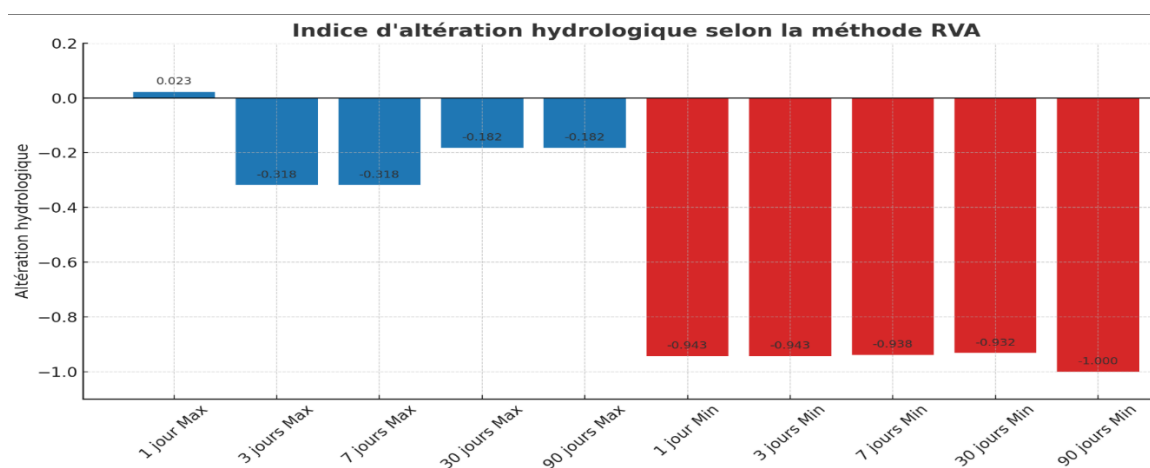


Figure III- 8: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.2.5 Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3

III.2.5.1 Analyse des dates des débits extrêmes et évaluation RVA

III.2.5.1.1 Date du débit minimal

Avant l'impact, la médiane de la date du débit minimal était le 228^e jour de l'année (soit vers la mi-août), avec une variabilité modérée (CD = 0,1038).

Après 1977, cette date est avancée au 214^e jour (début août), avec une légère hausse de la dispersion (CD = 0,1066).

Les valeurs minimales et maximales montrent une réduction de l'étalement des dates (de 3–319 jours avant impact à 175–282 après), traduisant une concentration des étiages sur une période plus courte (Tableau III- 7).

Selon la RVA, l'indice d'altération est de +0,08392, ce qui reste proche de zéro, indiquant que la date du débit minimal n'a pas été fortement modifiée par rapport aux conditions naturelles (Tableau III-7).

III.2.5.1.2 Date du débit maximal

La médiane du débit maximal passe du 65^e jour (début mars) avant l'impact à seulement 21 jours (fin janvier) après 1977, soit un avancement d'environ 1 mois et demi.

Le coefficient de dispersion diminue nettement (de 0,2541 à 0,1366), traduisant une réduction de la variabilité des dates de crue.

La plage des dates est également réduite (de 8–366 jours avant impact à 1–317 après), ce qui confirme une concentration temporelle plus nette des crues.

L'indice RVA est de -0,7438, ce qui reflète une altération hydrologique forte, indiquant que la période de survenue des crues a été significativement perturbée.

Tableau III- 8: Débits médians et de leur variabilité #3

Paramètres#3	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-1988			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Date du débit minimal	228	0,1038	3	319	214	0,1066	175	282
Date du débit maximal	65	0,2541	8	366	21	0,1366	1	317

Tableau III- 9: Altération hydrologique (RVA)1.3

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Date du débit minimal	210	239,8	0,08392
Date du débit maximal	67,24	130,9	-0,7438

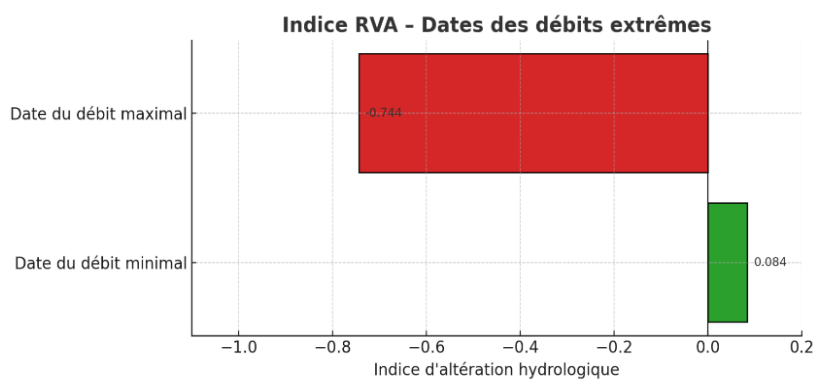


Figure III- 1: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.2.6 Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4

III.2.6.1 Analyse des impulsions de débit et évaluation RVA

III.2.6.1.1 Impulsions de faible débit

Le nombre médian d'impulsions de faible débit passe de 3 à 4 après 1977, soit une augmentation légère, bien que le coefficient de dispersion reste élevé (> 1), ce qui traduit une forte variabilité interannuelle.

La durée des impulsions augmente également, passant de 14,5 jours à 20,5 jours, avec une variabilité très élevée après impact (CD = 10,63), traduisant des épisodes plus longs et plus irréguliers de faibles débits (Tableau III-8).

Tableau III- 10: Débits médians et de leur variabilité #4

Paramètres#4	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-1988			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Nombre d'impulsions de faible débit	3	1,333	0	7	4	1,25	0	6
Durée des impulsions de faible débit	14,5	3,483	1	132	20,5	10,63	0	346
Nombre d'impulsions de fort débit	4	0,75	0	12	1	3	0	5
Durée des impulsions de fort débit	5,5	3,341	1	140	7,5	4,933	0	74,5
Seuil des impulsions de faible débit	-	-	0,14	-	-	-	-	-
Seuil des impulsions de fort débit	-	-	0,46	-	-	-	-	-

Selon Le tableau III-9 relatif à la méthode RVA :

- Le nombre d'impulsions de faible débit montre une altération significative (-0,7438), indiquant que la fréquence de ces épisodes s'écarte des conditions naturelles.
- En revanche, la durée des impulsions reste dans les limites de la variabilité naturelle (-0,06061), traduisant une altération faible.

6.1.2 Impulsions de fort débit

Le nombre d'impulsions de fort débit diminue fortement, passant de 4 avant impact à 1 après impact, avec un coefficient de dispersion plus élevé après 1977 (de 0,75 à 3), indiquant une réduction notable et irrégulière des événements de crue.

La durée moyenne de ces impulsions augmente légèrement (de 5,5 jours à 7,5 jours), bien que les événements soient moins fréquents et plus étalés dans le temps.

Les résultats RVA (Tableau III-9) confirment cette tendance :

- L'altération du nombre d'impulsions de fort débit est modérée à forte (-0,4716).
- L'altération de leur durée est également marquée (-0,4364), ce qui traduit une transformation significative du comportement naturel des crues.

Tableau III- 11: Altération hydrologique (RVA)1.4

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Nombre d'impulsions de faible débit	1,56	4,44	-0,7438
Durée des impulsions de faible débit	4	30,08	-0,06061
Nombre d'impulsions de fort débit	3	5	-0,4716
Durée des impulsions de fort débit	4,115	13,08	-0,4364

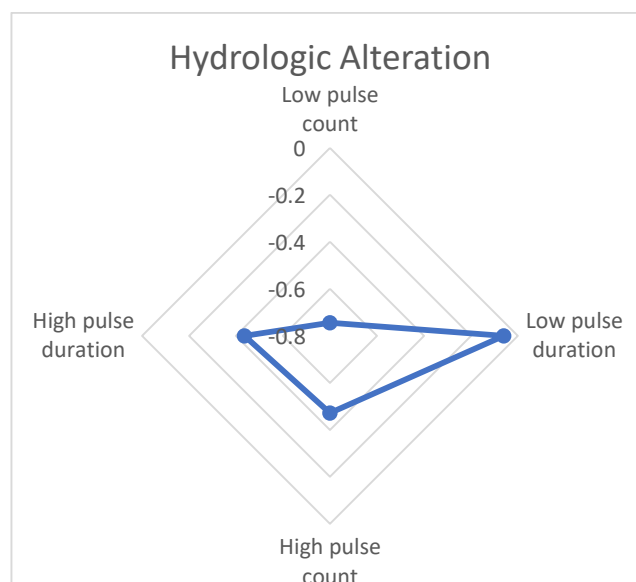


Figure III- 9: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.2.7 Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5

III.2.7.1 Analyse des variations hydrologiques et évaluation RVA

L'étude des paramètres du groupe #5 (taux et fréquence des variations hydrologiques) permet de mieux comprendre la dynamique des changements de débit avant (1947–1976) et après (1977–1988) l'impact. L'approche RVA (Range of Variability Approach) vient compléter l'analyse en mesurant l'altération par rapport à l'état de référence.

III.2.7.2 Taux de montée du débit

Avant l'impact, le taux de montée médian est de 0,04, avec une variabilité modérée (CD = 0,85).

Après 1977, ce taux chute à 0,015, avec un coefficient de dispersion divisé par deux (CD = 0,4), ce qui montre une réduction significative de la rapidité d'augmentation des débits.

Les extrêmes sont également resserrés (0,009 à 0,026), traduisant des montées de débit moins intenses et plus régulières (Tableau III-10).

- L'indice RVA est de -1, indiquant une altération hydrologique totale. Le régime naturel de montée des eaux est donc profondément modifié.

III.2.7.3 Taux de descente du débit

Le taux de descente passe de -0,04 à -0,023, soit une baisse de l'intensité des chutes de débit.

La variabilité reste similaire avant et après impact (CD autour de -0,55), mais les valeurs extrêmes sont réduites.

Cela indique une descente plus lente et plus contrôlée des débits, probablement due à la régulation par le barrage.

- L'indice RVA est de -0,7438, ce qui reflète une altération importante de la dynamique naturelle de baisse du débit.

III.2.7.4 Nombre d'inversions hydrologiques

Le nombre médian d'inversions hydrologiques (passages de montée à descente ou inversement) reste quasi stable : 51 avant impact, 50 après impact.

Toutefois, le coefficient de dispersion diminue fortement (de 0,667 à 0,34), ce qui montre une réduction de l'irrégularité dans ces changements.

- L'indice RVA est proche de zéro (0,02479), ce qui indique peu ou pas d'altération du point de vue du nombre d'inversions. Le rythme des fluctuations du débit a donc été globalement préservé (Tableau III- 11).

Tableau III- 12: Débits médians et de leur variabilité #5

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-1988			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Taux de montée du débit	0,04	0,85	0,0159	0,15	0,015	0,4	0,009	0,026

Taux de descente du débit	-0,04	-0,5547	-0,1	-0,02	-0,023	-0,5435	-0,04	-0,009
Nombre d'inversions hydrologiques	51	0,6667	11	110	50	0,34	26	70

Tableau III- 13: Altération hydrologique (RVA)1.5

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Taux de montée du débit	0,02739	0,05	-1
Taux de descente du débit	-0,0522	-0,039	-0,7438
Nombre d'inversions hydrologiques	45,56	58,76	0,02479

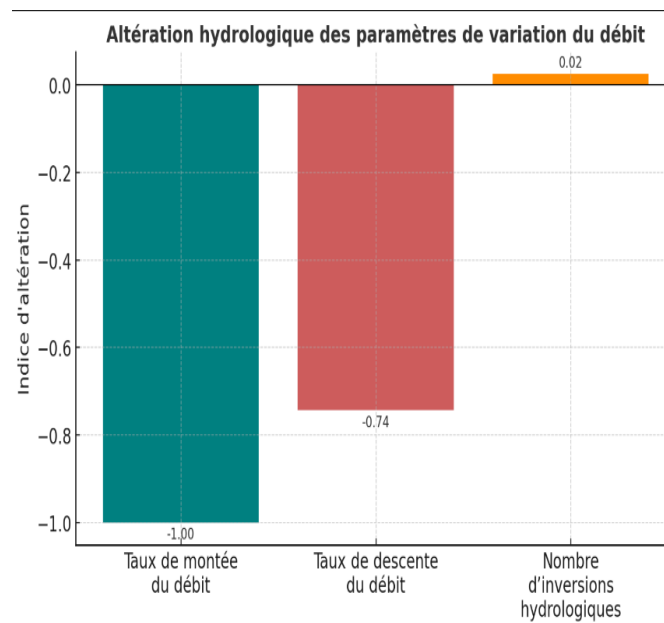


Figure III- 10: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.3 Effet combiné du changement climatique et de la construction du barrage (1947–1976 / 1977–2020)

Dans cette seconde partie consacrée aux résultats, l'année 1976-77 est retenue comme date de rupture du régime hydrologique.

Le tableau ci-après présente une comparaison des principaux paramètres hydrologiques observés avant et après cette période charnière, permettant d'évaluer les altérations survenues à travers les indicateurs hydrologiques IHA.

Tableau III- 14: Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)²

Paramètres	Avant impact 1947-1976	Après impact 1977-2020
Facteur de normalisation	1	1
Débit moyen annuel	0,48	0,22
Débit moyen non normalisé	0,48	0,22
Coefficient de variation annuel	3,64	4,89
Prévisibilité du débit	0,46	0,43
Constance du débit / prévisibilité du débit	0,67	0,65
Proportion maximale d'inondations sur une période de 60 jours	0,31	0,31
Durée de la saison sans crues	51	40

III.3.1 Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles

Groupe de Paramètres #1

Analyse des conditions hydrologiques du bassin versant de l'Oued Chouly (1947-2020)

L'étude des débits médians mensuels et de leur variabilité pour le bassin versant de l'Oued Chouly sur la période 1947-2020 révèle des changements significatifs dans le régime hydrologique de la région.

III.3.1.1 Réduction des débits médians

L'analyse comparative entre la période avant l'impact (1947-1976) et la période après l'impact (1977-2020) met en évidence une diminution notable des débits médians mensuels. Cette baisse est particulièrement marquée durant les mois de mai, juin, juillet et août, traduisant une réduction significative des écoulements en période estivale. Cette évolution pourrait impacter

directement la disponibilité des ressources en eau, en particulier pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable (Tableau III- 15).

III.3.1.2 Augmentation de la variabilité hydrologique

Le coefficient de dispersion (CD), indicateur de la variabilité des débits, augmente significativement après 1977. Par exemple, en février, il passe de 0,9882 à 3,295, et en mars, de 1,216 à 4,229.

Cette augmentation traduit un régime d'écoulement plus irrégulier et imprévisible, probablement influencé par des changements climatiques et des interventions anthropiques. L'instabilité accrue des débits pourrait avoir un impact sur la gestion des ressources hydriques et la protection contre les événements extrêmes.

III.3.2 Évolution des valeurs extrêmes (débits minimaux et maximaux)

Une analyse des valeurs minimales et maximales met en évidence une augmentation des débits maximaux après 1977 pour plusieurs mois. Par exemple, en janvier, le débit maximal passe de 1,884 à 3,9, et en février, de 1,74 à 3,34. Cette tendance suggère une intensification des épisodes de crues, possiblement en raison de précipitations plus intenses ou de modifications du bassin versant.

Parallèlement, les valeurs minimales après 1977 sont souvent inférieures à celles de la période précédente, indiquant une accentuation des périodes de sécheresse. Cette situation peut poser un risque accru pour la disponibilité en eau, en particulier pendant les mois secs (Tableau III-16).

Tableau III- 17: Débits médians et de leur variabilité #2.1

Paramètres#1	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-2020			
	Médians	CD	Min	Max	Médians	CD	Min	Max
Jan	0,348	1,22	0,109	1,884	0,1	0,93	0,035	3,9
Fev	0,467	0,9882	0,139	1,74	0,1075	3,295	0,045	3,34
Mars	0,435	1,216	0,124	2,46	0,1235	4,229	0,035	2,16
Avril	0,4915	1,114	0,14	1,95	0,1038	2,578	0,031	0,8044
Mai	0,49	1,194	0,094	1,88	0,071	1,444	0,027	0,459
Juin	0,25	0,68	0,064	0,63	0,045	0,8889	0,019	0,16
Juill	0,16	0,3375	0,0556	0,53	0,031	0,5806	0,01	0,1
Août	0,1024	0,6006	0,03	0,26	0,027	0,2963	0,01	0,071
Sep	0,12	0,4754	0,03	0,33	0,027	0,2963	0,01	0,15
Oct	0,14	0,8196	0,064	0,48	0,035	0,6571	0,019	0,106
Nov	0,175	0,5771	0,055	0,61	0,045	1,033	0,023	0,28
Déc	0,24	0,7944	0,079	0,85	0,071	0,7746	0,035	2,94

L'altération est globalement négative selon le **Tableau III- 14**, avec des valeurs particulièrement marquées en février (-0,938), octobre (-0,9318) et décembre (-0,876), indiquant une forte diminution des écoulements.

Certains mois (juin, juillet, août, septembre, novembre) affichent une altération maximale (-1), traduisant un effondrement du régime d'écoulement naturel, dû à l'évapotranspiration, la baisse des précipitations et les prélèvements anthropiques.

Tableau III- 18: Altération hydrologique mensuelle (RVA)2.1

Paramètres#1	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Jan	0,2408	0,5516	-0,6591
Fev	0,41	0,6929	-0,938
Mars	0,41	0,7762	-0,5661
Avril	0,3675	0,72	-0,6901
Mai	0,2715	0,6993	-0,7273
Juin	0,17	0,3008	-1
Juill	0,1384	0,17	-1
Août	0,08615	0,1395	-1
Sep	0,1	0,1339	-1
Oct	0,106	0,1677	-0,9318
Nov	0,17	0,1938	-1
Déc	0,2146	0,28	-0,876

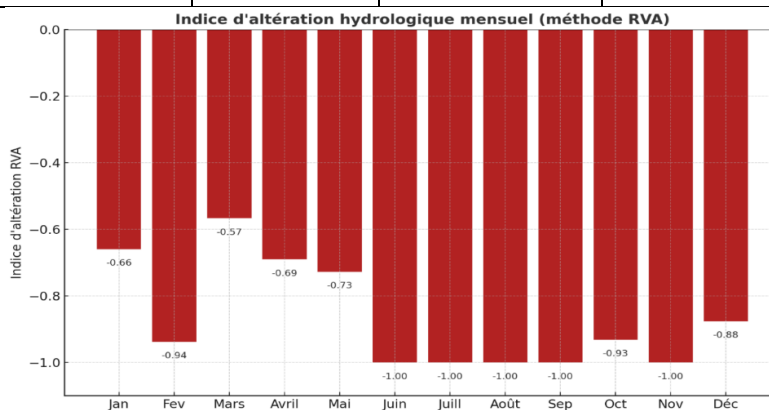


Figure III- 11: Indice d'altération hydrologique selon RVA

IV.3.2 Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact

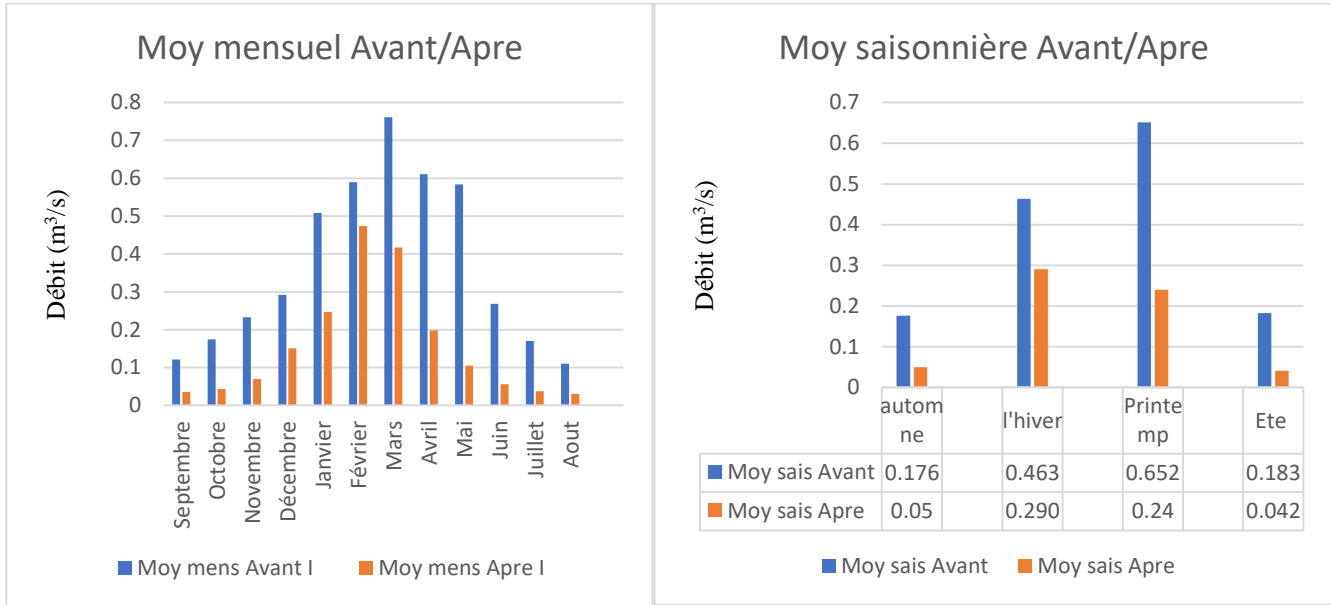


Figure III- 12: Variation saisonnière et mensuelle des débits

III.3.2.1 Évolution des débits mensuels

L'analyse des débits moyens mensuels (Figure III- 13) avant et après l'impact du bassin versant de l'Oued Chouly sur la période 1947-2020 met en évidence une réduction significative des écoulements après 1977.

Avant impact (1947-1976), les débits étaient plus élevés sur l'ensemble de l'année, avec un maximum en mars ($\approx 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$) et des valeurs relativement importantes en janvier, février, avril et mai.

Après impact (1977-2020), les débits ont diminué sur tous les mois, avec une baisse particulièrement marquée durant les mois de hautes eaux (janvier à mai).

Les périodes de basses eaux (juin à septembre) affichent également une forte diminution, avec des débits atteignant près de zéro pour certains mois comme août et septembre.

Cette baisse généralisée des débits mensuels après 1977 confirme une réduction significative de la ressource en eau, traduisant un impact potentiel des facteurs climatiques et anthropiques, tels que la diminution des précipitations, l'augmentation des prélèvements d'eau ou la régulation du cours d'eau par des infrastructures hydrauliques.

III.3.2.2 Évolution des débits saisonniers

L'analyse des débits moyens saisonniers renforce les constats observés à l'échelle mensuelle (Figure III- 14).

Avant impact, les débits étaient nettement plus élevés durant l'hiver ($0,46 \text{ m}^3/\text{s}$) et le printemps ($0,65 \text{ m}^3/\text{s}$), reflétant l'apport des pluies hivernales et la fonte des neiges.

Après impact, ces valeurs ont chuté respectivement à 0,29 m³/s en hiver et 0,24 m³/s au printemps, soit une réduction de 37% et 63%, illustrant un affaiblissement du régime hydrologique saisonnier.

En été et en automne, les débits sont historiquement plus faibles, mais la diminution reste significative, avec des valeurs passant de 0,18 m³/s à 0,04 m³/s en été et de 0,17 m³/s à 0,05 m³/s en automne.

Ces résultats montrent une diminution plus marquée au printemps et en été, ce qui pourrait être lié à une réduction des précipitations printanières, une baisse de la recharge des nappes et une augmentation des prélèvements d'eau pour l'irrigation.

III.3.3 Échelle annuelle

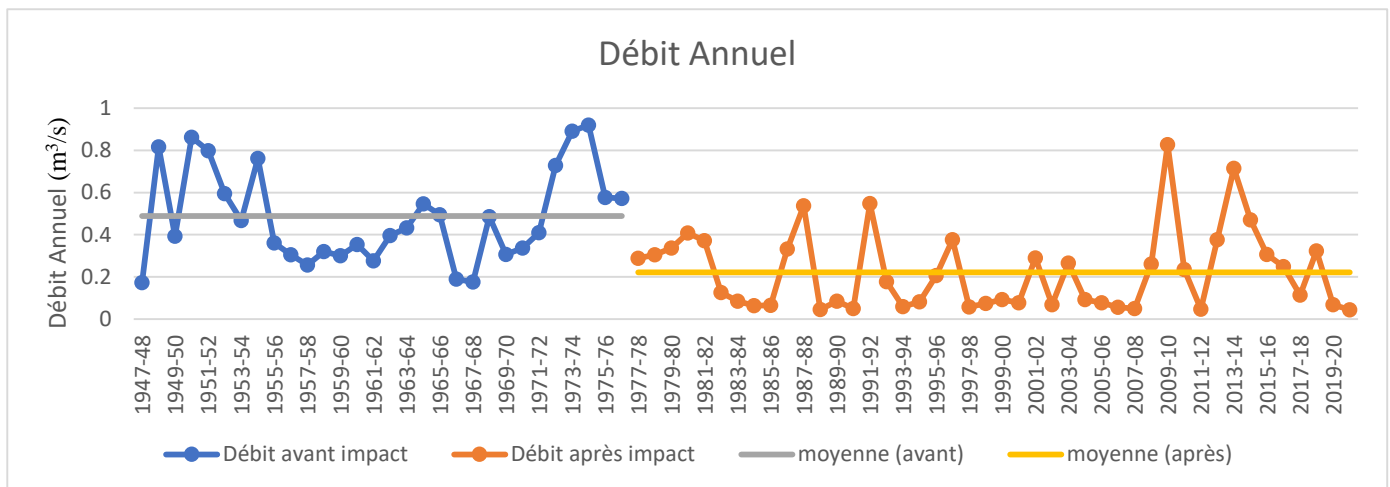


Figure III- 15: L'évolution du débit annuel

Le débit annuel du bassin versant de l'Oued Chouly sur la période 1947-2020 (**Figure III-16**).

La moyenne du débit annuel est établie à 0,489 m³/s avant impact et 0,222 m³/s après impact. La valeur maximale du débit a été enregistrée en 1974-75, atteignant 0,919 m³/s, tandis que la valeur minimale a été observée en 2020-2021, avec un débit de seulement 0,043 m³/s.

Une tendance générale de diminution du débit est observée à partir du début des années 1970, avec une baisse notable en 1977-78, qui est restée en dessous de la moyenne par la suite jusqu'à l'année 2020. Cette période est caractérisée par des fluctuations, avec des périodes de croissance et de diminution, mais le débit reste globalement inférieur à la moyenne enregistrée avant l'impact.

À partir des années 1980, une stabilisation des valeurs autour d'une moyenne plus basse est observée, marquée par une variabilité accrue dans certaines années (1987-88, 2011-12, 2013-14). Cette tendance indique une modification du régime hydrologique, possiblement influencée par des facteurs anthropiques ou climatiques.

III.3.4 Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #2

III.3.4.1 Débits maximaux

1 et 3 jours max (1947- 1976 /1977-2020)

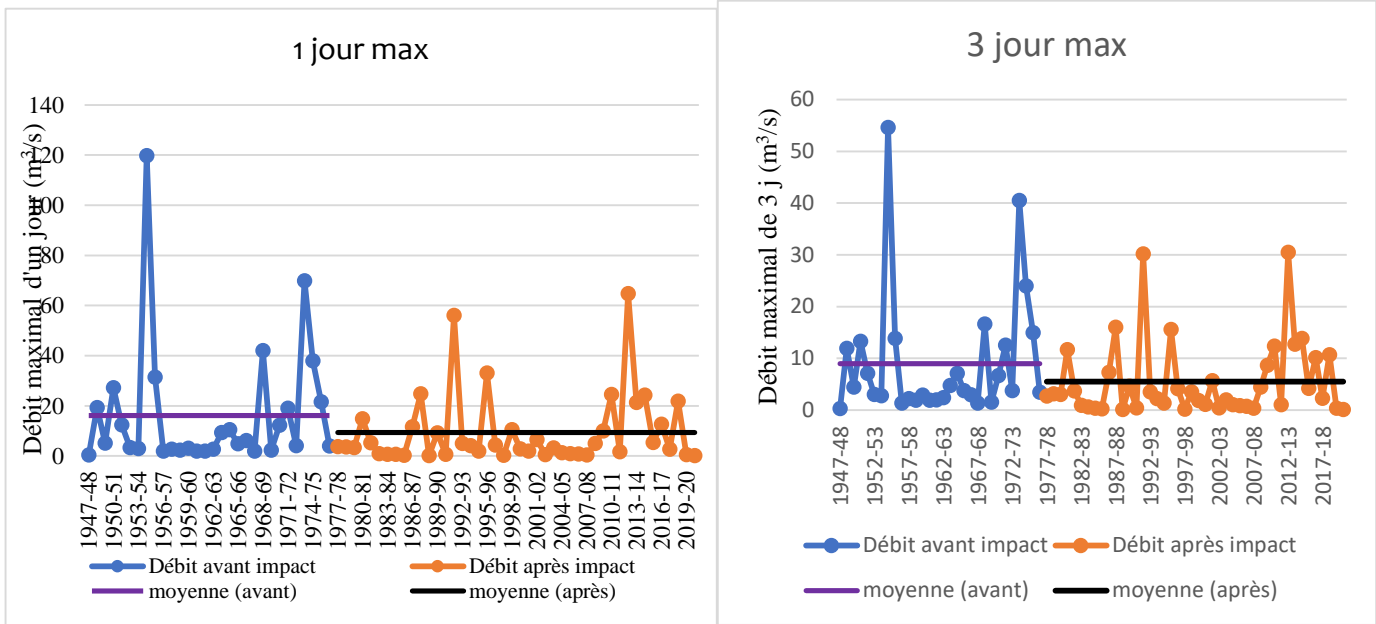


Figure III- 17: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours max)

L'analyse de la variabilité interannuelle des débits maximaux journaliers (1 jour et 3 jours) entre 1947-48 et 2020-21 met en évidence deux périodes distinctes (**Figure III-13**) : avant impact (1947-48 à 1976-77) et après impact (1977-78 à 2020-21). On observe une baisse significative des crues extrêmes entre les deux périodes, traduisant une atténuation du régime hydrologique.

Pour les débits maximaux sur 1 jour, la moyenne annuelle chute de 16,2 m³/s à 9,32 m³/s, soit une réduction de 42,5%. Le débit maximum observé passe de 119,8 m³/s à 64,82 m³/s. Malgré cette baisse, la variabilité annuelle reste marquée, avec des coefficients de variation élevés (1,547 avant et 1,504 après impact), témoignant d'une dynamique toujours imprévisible.

Une tendance similaire est observée pour les débits maximaux sur 3 jours, où la moyenne diminue d'environ 9 m³/s à 5,5 m³/s (soit -38,89%), et le débit maximum passe de 54,63 m³/s à 30,53 m³/s. Les coefficients de variation (2,813 avant, 2,604 après) confirment une forte dispersion des valeurs annuelles, bien qu'une légère stabilisation apparaisse après l'impact.

Les graphiques analysés montrent qu'avant l'impact, les crues extrêmes étaient plus fréquentes et irrégulières, alors qu'après l'impact, elles sont moins intenses et plus espacées, bien que certains pics subsistent (notamment en 1990 et 2013). Ce changement pourrait résulter d'une combinaison de facteurs climatiques et anthropiques, notamment la mise en eau du barrage El Izdihar.

Ce déficit hydrologique important, chiffré à environ -0,42 (1 jour) et -0,39 (3 jours), souligne la transformation du régime des crues et appelle à adapter les stratégies de gestion des ressources en eau face à des événements hydrologiques moins fréquents mais toujours potentiellement extrêmes.

7 et 90 jours max (1947-1976 /1977-2020)

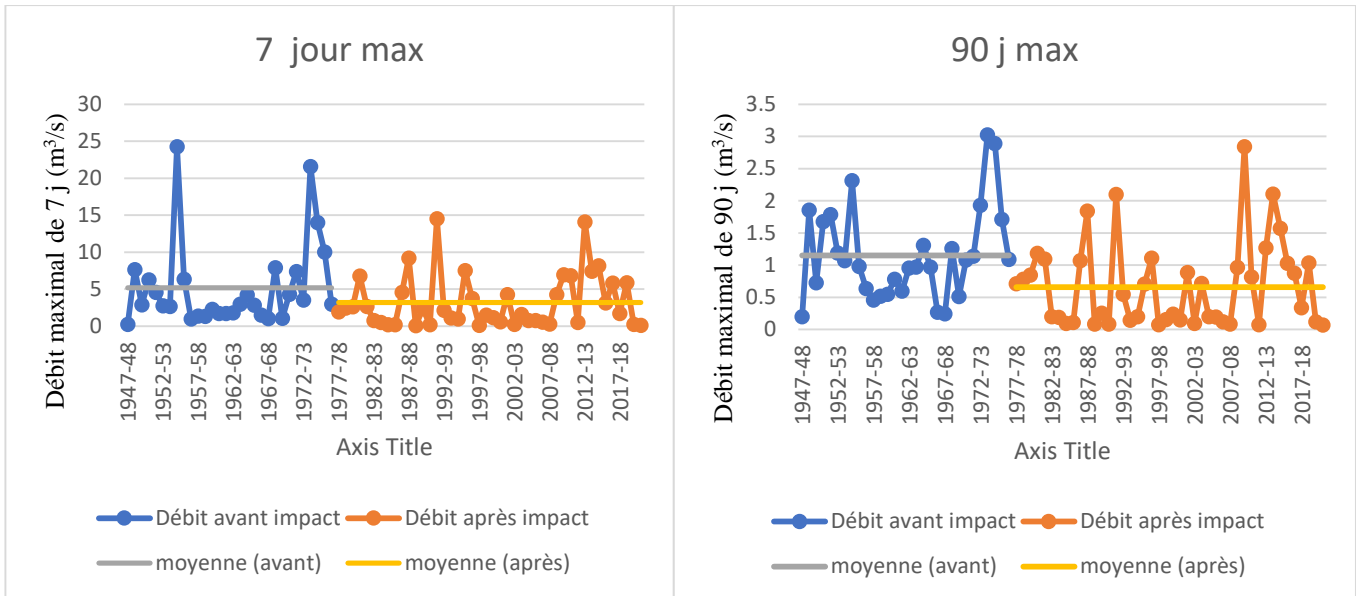


Figure III- 18: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours max)

L'analyse de la variabilité interannuelle des débits maximaux journaliers sur des périodes prolongées (7 jours et 90 jours) dans le bassin versant de l'Oued Chouly, entre 1947-48 et 2020-21, met en évidence deux phases hydrologiques bien distinctes (**Figure III-14**): une période pré-impact (1947-48 à 1976-77) et une période post-impact (1977-78 à 2020-21), influencées notamment par la mise en service du barrage El Izdihar et les effets du changement climatique.

Pour les crues maximales sur 7 jours, la moyenne des débits a chuté de 38 %, passant de 24,25 m³/s à 14,52 m³/s. Cette baisse traduit une réduction notable de l'intensité des événements extrêmes. Bien que le débit maximum interannuel ait diminué, la variabilité a augmenté : le coefficient de variation est passé de 1,682 avant impact à 2,701 après impact. Cela indique que, malgré une baisse générale des crues, leur comportement demeure instable et imprévisible. Avant l'impact, les crues étaient plus fréquentes et plus intenses, atteignant parfois plus de 25 m³/s. Après l'impact, les crues majeures sont moins nombreuses mais persistent de manière sporadique, comme en 1992 et 2013, avec des pics d'ampleur moindre.

L'analyse des débits maximaux sur 90 jours confirme cette évolution. La moyenne passe de 1,15 m³/s à 0,66 m³/s, soit une réduction d'environ 42 %, accompagnée d'une baisse du débit maximum interannuel de 3,027 m³/s à 2,839 m³/s. Cette évolution suggère une atténuation des événements hydrologiques prolongés. Parallèlement, les coefficients de variation ont augmenté de 0,6252 à 0,9863, ce qui traduit une plus grande instabilité interannuelle des débits même sur les longues périodes.

Ce déficit hydrologique généralisé, estimé entre -38 % et -42 %, souligne une baisse significative de la recharge des nappes, de la disponibilité en eau et de la durée des écoulements. Bien que cette évolution puisse réduire le risque d'inondation, elle accentue la vulnérabilité aux sécheresses, et rend plus complexe la gestion durable des ressources hydriques. Ces résultats appellent à adapter les stratégies de gestion pour faire face à des régimes hydrologiques devenus à la fois moins intenses mais plus variables.

III.3.4.2 Débits minimaux

1 et 3 jours min (1947-1976 /1977-2020)

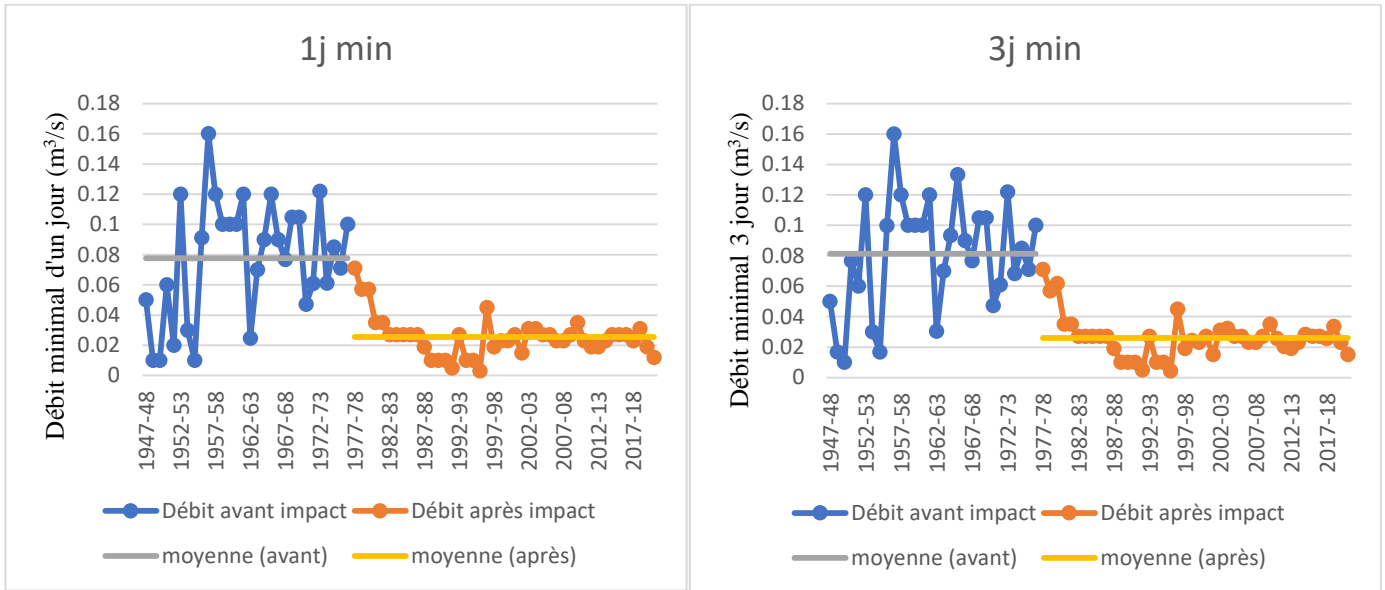


Figure III- 19: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours min)

L'analyse de la variabilité interannuelle des débits journaliers minimaux dans le bassin versant de l'Oued Chouly, sur la période 1947-48 à 2019-20 (Figure III- 20), révèle une transformation significative du régime hydrologique, marquée par une rupture entre deux périodes distinctes : avant impact (1947-48 à 1975-76) et après impact (1977-78 à 2019-20).

Pour les débits minimaux sur 1 jour, la moyenne annuelle passe de $0,078 \text{ m}^3/\text{s}$ avant impact à $0,029 \text{ m}^3/\text{s}$ après impact, soit une réduction d'environ 67 %. Le minimum interannuel chute également de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ à $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, traduisant une accentuation des périodes d'assèchement. Le coefficient de variation passe de 1,32 à 1,21, suggérant une variabilité toujours élevée mais légèrement atténuée. Avant l'impact, les débits minimaux étaient plus soutenus, avec des périodes de stabilité relative. Après l'impact, les valeurs chutent durablement, malgré quelques années de remontée ponctuelle comme en 1995-96 et 2011-12, mais ces épisodes restent rares et de faible amplitude.

L'évolution des débits minimaux sur 3 jours confirme cette tendance. La moyenne chute de $0,081 \text{ m}^3/\text{s}$ à $0,026 \text{ m}^3/\text{s}$, soit également une baisse de 67 %. Le coefficient de variation passe de 0,50 avant impact à 0,43 après impact, montrant une relative stabilisation des valeurs à un niveau plus bas. Avant l'impact, les valeurs minimales alternaient entre périodes élevées et baisses significatives, témoignant d'une meilleure résilience du système hydrologique. Après l'impact, une tendance claire à la baisse des minima s'installe, avec des sécheresses plus fréquentes, plus longues et plus intenses, notamment à partir des années 1980.

Ce déficit hydrologique global de 67 % pour les minima sur 1 jour et 3 jours met en lumière une dégradation de la disponibilité en eau en période sèche. Cette situation compromet la recharge des nappes, la continuité écologique et l'usage agricole ou domestique, rendant urgente l'adaptation des stratégies de gestion de l'eau dans le bassin.

7 et 90 jours min (1947-1976 /1977-2020)

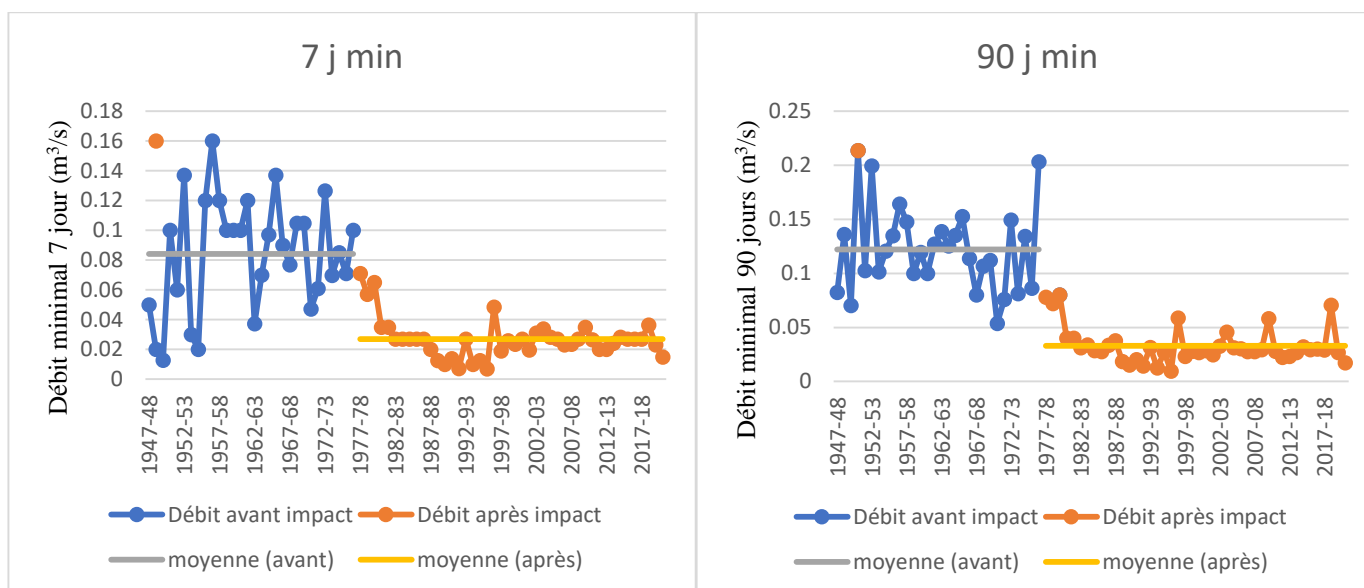


Figure III- 21: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours min)

L'analyse de la variabilité interannuelle des débits journaliers minimaux prolongés (sur 7 et 90 jours) dans le bassin versant de l'Oued Chouly, pour la période 1947-48 à 2020-21 (Figure III-16), met en évidence deux régimes hydrologiques contrastés : avant impact (1947-48 à 1976-77) et après impact (1977-78 à 2020-21).

Pour les débits minimaux sur 7 jours, la moyenne annuelle chute de 0,0842 m³/s à 0,0269 m³/s, soit une diminution de 68 %. Le débit minimal interannuel baisse également, mettant en évidence une réduction marquée de la disponibilité en eau pendant les périodes d'été. Bien que le coefficient de variation passe de 0,481 à 0,416, indiquant une légère stabilisation des valeurs, cette stabilité se fait à un niveau très bas. En parallèle, le débit maximal interannuel diminue de 0,16 m³/s à 0,07 m³/s (-56 %), illustrant une perte de dynamisme du régime hydrologique.

Les débits minimaux sur 90 jours confirment cette tendance. La moyenne passe de 0,1223 m³/s avant impact à 0,0332 m³/s après impact, soit une réduction de 72,8 %, marquant une diminution sévère des ressources disponibles sur des périodes longues. Le coefficient de variation, en légère hausse de 0,331 à 0,337, suggère que malgré une certaine stabilisation structurelle, les écoulements restent irréguliers. Le débit maximal interannuel, quant à lui, passe de 0,16 m³/s dans les années 1950 à seulement 0,06 m³/s après 1979, soit une baisse de 62,5 %.

Ces résultats révèlent un déficit hydrologique profond, évalué à -68 % pour les débits minimaux sur 7 jours et -72,8 % sur 90 jours. Cette situation témoigne d'un assèchement progressif du régime hydrologique, réduisant la résilience du bassin face aux périodes de sécheresse. Ces évolutions doivent impérativement être prises en compte dans la planification et la gestion des ressources en eau, notamment pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable, et la préservation des écosystèmes.

L'analyse comparative des crues entre les deux périodes étudiées (1947-1976 et 1977-2020) révèle des changements notables dans le régime hydrologique du bassin (Tableau III- 19).

III.3.4.3 Évolution des crues maximales

Diminution significative des médianes : Les valeurs maximales sur différentes périodes ont enregistré une nette baisse. Par exemple, la médiane du débit maximal journalier est passée de 5,05 m³/s à 3,677 m³/s, soit une réduction d'environ 27 %, tandis que sur 90 jours, elle est passée de 1,027 m³/s à 0,4438 m³/s, soit une baisse de près de 57 %.

Réduction des pics extrêmes : Les valeurs maximales absolues ont également diminué, ce qui témoigne d'une atténuation des crues extrêmes. Le débit maximal journalier est passé de 119,8 m³/s à 64,82 m³/s, et celui sur 90 jours de 3,027 m³/s à 2,839 m³/s.

Diminution des valeurs minimales : Cela indique une baisse globale de l'intensité des crues, confirmant un affaiblissement général des événements extrêmes.

Évolution de la variabilité : Le coefficient de dispersion (C.D) a diminué pour les crues courtes (1 à 3 jours), ce qui traduit une stabilisation des crues brèves. En revanche, une hausse du C.D. est observée pour les périodes longues (7 à 90 jours), rendant les crues longues moins prévisibles (Tableau III- 20).

III.3.4.4 Évolution des débits minimaux

Chute des médianes : Les débits minimaux ont fortement baissé. Pour le débit journalier minimal, la médiane est passée de 0,0875 m³/s à 0,027 m³/s. Sur 90 jours, elle est descendue de 0,1201 m³/s à 0,02878 m³/s, révélant un affaiblissement notable du régime hydrologique, et augmentant ainsi le risque d'assèchement du cours d'eau.

Réduction de la variabilité : Le C.D. a fortement baissé, de 0,6343 à 0,2963 pour 1 jour et de 0,3684 à 0,3031 pour 90 jours. Cette diminution traduit une stabilisation des écoulements, mais à des niveaux très faibles, ce qui accentue la vulnérabilité du bassin en période de sécheresse.

Diminution des extrêmes : Les extrêmes des débits minimaux ont également chuté. Le débit minimal journalier maximum est passé de 0,16 m³/s à 0,071 m³/s, et le minimum absolu a atteint 0,003 m³/s après 1977 (Tableau III- 21).

Tableau III- 22: Débits médians et de leur variabilité #2.2

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-2020			
	Médianes	C.D	Minimum	Maximum	Médianes	C.D	Minimum	Maximum
1 jour Max	5,05	3,426	0,39	119,8	3,677	2,874	0,132	64,82
3 joursMax	3,762	2,813	0,31	54,63	2,896	2,604	0,1147	30,53
7 jours Max	2,941	1,682	0,2643	24,25	1,845	2,701	0,1063	14,52
30 joursMax	1,844	0,832	0,2	6,809	0,8817	2,096	0,09653	5,083
90 joursMax	1,027	1,073	0,2	3,027	0,4438	2,043	0,07432	2,839
1 jour Min	0,0875	0,6343	0,01	0,16	0,027	0,2963	0,003	0,071
3 joursMin	0,0875	0,5406	0,01	0,16	0,027	0,3333	0,004333	0,071

7 jours Min	0,09357	0,5461	0,01286	0,16	0,027	0,2963	0,006857	0,071
30 jours Min	0,1	0,5485	0,029	0,1747	0,027	0,3247	0,009333	0,0757
90 jours Min	0,1201	0,3684	0,05364	0,2136	0,02878	0,3031	0,009633	0,08018

L'analyse RVA (Range of Variability Approach) (**Tableau III-16**) met en évidence une altération hydrologique significative du régime des débits de l'Oued Chouly.

- Pour les débits maximaux, seule la valeur de 1 jour Max reste proche des conditions naturelles (altération = 0,02273), tandis que les autres périodes présentent des altérations modérées à marquées (jusqu'à -0,3182), traduisant une réduction des crues prolongées.
- Les débits minimaux montrent une forte altération, avec des indices allant de -0,9318 à -1, signalant une diminution sévère des étiages.

Ces résultats reflètent l'impact du changement climatique, affectant aussi bien les crues que les périodes de sécheresse, avec des conséquences importantes sur les écosystèmes et la disponibilité en eau.

Tableau III- 23: Altération hydrologique (RVA)2.2

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
1 jour Max	3,048	12,37	0,02273
3 jours Max	2,834	7,111	-0,3182
7 jours Max	1,951	4,522	-0,3182
30 jours Max	1,258	2,395	-0,1818
90 jours Max	0,743	1,244	-0,1818
1 jour Min	0,06105	0,1	-0,9432
3 jours Min	0,06867	0,1	-0,9432
7 jours Min	0,06987	0,1	-0,938
30 jours Min	0,07292	0,1061	-0,9318
90 jours Min	0,1016	0,1351	-1

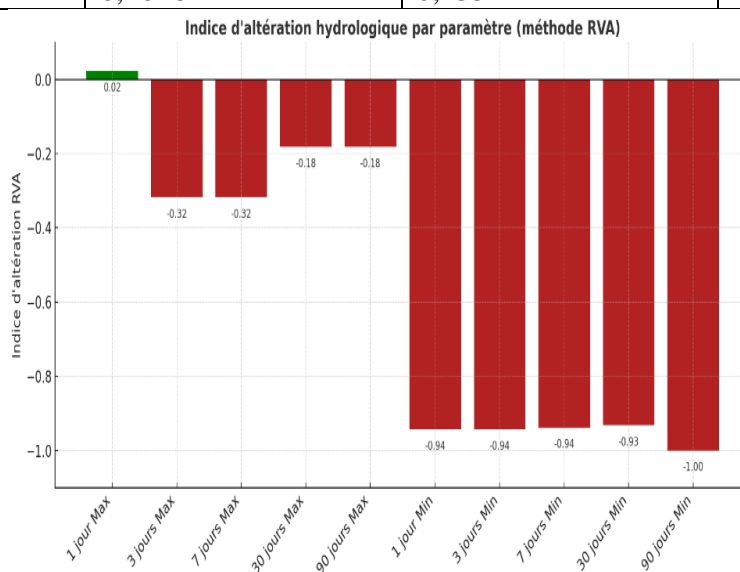


Figure III- 22: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.3.5 Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3

La date médiane du débit minimal a légèrement avancé, passant de 228,5 jours avant l'impact à 217 jours après, avec une augmentation de la variabilité.

De même, la date médiane du débit maximal est passée de 67 jours à 52 jours, traduisant une anticipation des crues.

Le coefficient de dispersion des débits maximaux a diminué, indiquant une réduction de leur variabilité (Tableau III- 24).

Tableau III- 25: Débits médians et de leur variabilité

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-2020			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Date du débit minimal	228,5	0,09631	3	319	217	0,1148	75	282
Date du débit maximal	67	0,2616	8	366	52	0,1755	1	350

D'après les résultats du (Tableau III- 26) relatifs aux indices RVA appliqués aux dates des débits extrêmes :

Date du débit minimal : L'indice d'altération hydrologique positif (0,1591) indique une légère modification dans l'occurrence du débit minimal, avec une variabilité contenue entre 210,9 et 241,1 jours. Cette évolution peut être liée à des changements climatiques ou à des régulations anthropiques influençant la baisse des écoulements.

Date du débit maximal : L'indice d'altération négatif (-0,1818) traduit un décalage des crues maximales, suggérant une réduction de leur intensité ou un changement dans leur répartition temporelle. L'intervalle (70,61 à 131,5 jours) montre une variabilité notable, possiblement influencée par des facteurs comme la gestion des barrages,

Tableau III- 27: Altération hydrologique (RVA)2.3

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Date du débit minimal	210,9	241,1	0,1591
Date du débit maximal	70,61	131,5	-0,1818

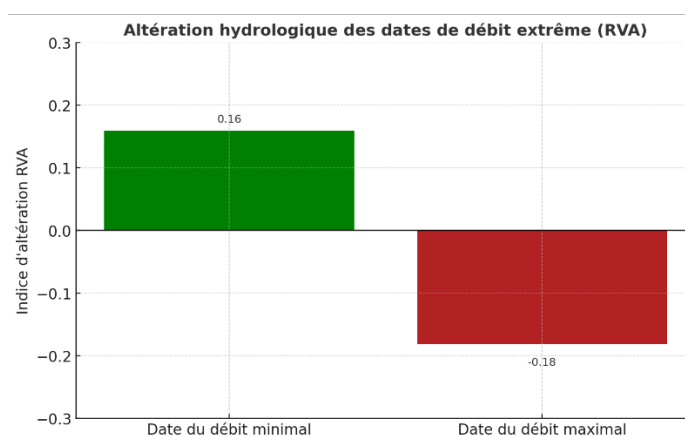


Figure III- 23: Indice d'altération hydrologique selon RVA

III.3.6 Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4

L'analyse des impulsions hydrologiques du bassin versant de l'Oued Chouly avant (1947-1976) et après l'impact (1977-2020) (Tableau III- 28).

Le nombre d'impulsions de faible débit est resté stable, mais leur durée a fortement augmenté, passant de 16 jours en médiane avant l'impact à 57 jours après, avec un maximum atteignant 403 jours. Cela indique une intensification des périodes de sécheresse.

En parallèle, le nombre d'impulsions de fort débit a diminué, passant de 4 à 2 événements en médiane, traduisant une réduction de la fréquence des crues.

Toutefois, leur durée reste variable, avec un maximum de 80 jours après l'impact contre 140 auparavant.

Tableau III- 29: Débits médians et de leur variabilité #2.4

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-2020			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Nombre d'impulsions de faible débit	3	1,333	0	7	3	1,25	0	8
Durée des impulsions de faible débit	16	3,219	1	132	57	2,632	0	403
Nombre d'impulsions de fort débit	4	0,5625	0	11	2	1,375	0	6
Durée des impulsions de fort débit	8,5	3	1	140	4	1,75	0	80
Seuil des impulsions de faible débit	-	-	0,14	-	-	-	-	-

Seuil des impulsions de fort débit	-	-	0,48	-	-	-	-	-
---	---	---	------	---	---	---	---	---

D'après les résultats du (Tableau III- 30) relatifs aux indices RVA :

Nombre d'impulsions de faible débit : Une altération légèrement positive (0,1777) indique une stabilité, voire une légère augmentation du nombre d'événements de faible débit, traduisant une régularité accrue des périodes de faibles écoulements.

Durée des impulsions de faible débit : Une altération négative (-0,2657) témoigne d'un allongement des périodes de faible débit, suggérant une accentuation des périodes de sécheresse et une diminution de la recharge en eau.

Nombre d'impulsions de fort débit : Avec une altération de -0,3984, on observe une diminution notable du nombre d'épisodes de crues, traduisant une réduction des événements de forte intensité.

Durée des impulsions de fort débit : Une altération négative de -0,3182 met en évidence une diminution de la durée des épisodes de fort débit, ce qui pourrait refléter un affaiblissement des crues ou une régulation accrue des écoulements.

Globalement, ces altérations hydrologiques révèlent un régime marqué par des périodes de sécheresse prolongées et une atténuation des crues.

Tableau III- 31: Altération hydrologique (RVA)2.4

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Nombre d'impulsions de faible débit	1,23	4	0,1777
Durée des impulsions de faible débit	4	31,6	-0,2657
Nombre d'impulsions de fort débit	3	5	-0,3984
Durée des impulsions de fort débit	4,45	19,6	-0,3182

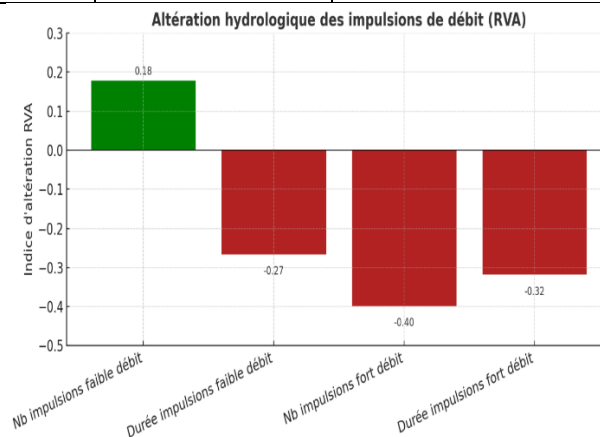


Figure III- 24: L'altération hydrologique observée

III.3.7 Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5

III.3.7.1 Taux de montée du débit

Avant l'impact, la médiane du taux de montée du débit était de 0,04, tandis qu'après l'impact, elle a diminué à 0,014.

Le coefficient de dispersion a fortement baissé (0,9088 à 0,3571), indiquant une variabilité plus réduite après 1977.

Cette diminution traduit une montée des crues plus lente (Tableau III- 32).

III.3.7.2 Taux de descente du débit

Avant l'impact, la médiane du taux de descente du débit était de -0,04, alors qu'après l'impact, elle est passée à -0,0175, traduisant un ralentissement de la décrue.

Le coefficient de dispersion a légèrement diminué (-0,5324 à -0,5143), signalant une moindre variabilité dans la vidange des cours d'eau.

Cette tendance suggère une gestion plus contrôlée des lâchers d'eau et une rétention accrue des écoulements en amont, réduisant ainsi les variations brusques de débit après une crue.

III.3.7.3 Nombre d'inversions hydrologiques

Le nombre médian d'inversions hydrologiques (changements entre montée et descente du débit) est passé de 50 à 66 événements.

Cette augmentation indique une plus grande instabilité dans le régime hydrologique, possiblement causée par une variabilité accrue des précipitations ou par des interventions anthropiques affectant la dynamique naturelle du bassin.

Toutefois, le coefficient de dispersion a diminué (0,595 à 0,4356), suggérant une réduction des fluctuations extrêmes dans ces inversions. (Tableau III- 33)

Tableau III- 34: Débits médians et de leur variabilité #2.5

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1976				Période après l'impact 1977-2020			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Taux de montée du débit	0,04	0,9088	0,0159	0,15	0,014	0,3571	0,004	0,1047
Taux de descente du débit	-0,04	-0,5324	-0,1	-0,02	-0,0175	-0,5143	-0,04	-0,007

Nombre d'inversions hydrologiques	50	0,595	11	110	66	0,4356	26	115
--	----	-------	----	-----	----	--------	----	-----

D'après les résultats du (Tableau III- 35) relatifs aux indices RVA appliqués aux dates des débits extrêmes :

Le taux de montée du débit a fortement diminué (altération de -0,9318), traduisant une montée plus lente des crues, probablement due à la régulation des écoulements (barrages, gestion des eaux).

Le taux de descente du débit est également en baisse (altération de -0,8636), indiquant une diminution des chutes rapides du débit, ce qui peut influencer la recharge des nappes et les écoulements naturels.

Le nombre d'inversions hydrologiques a légèrement diminué (altération de -0,3864), suggérant un régime hydrologique plus stable avec moins de fluctuations entre les phases de montée et de descente du débit.

Tableau III- 36: Altération hydrologique (RVA)2.5

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Taux de montée du débit	0,02871	0,05	-0,9318
Taux de descente du débit	-0,05385	-0,03923	-0,8636
Nombre d'inversions hydrologiques	45,23	56,54	-0,3864

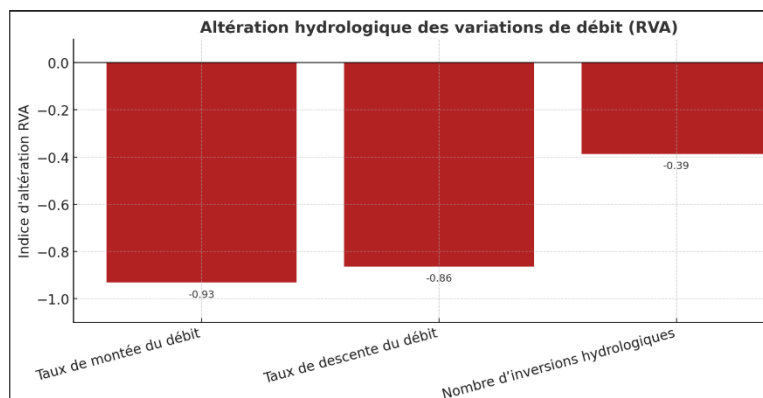


Figure III- 25: L'altération hydrologique observée

III.3.7.4 Mise en eau du barrage en 1988 (avant/après 1988)

Dans cette section, l'année 1988, correspondant à la mise en eau du barrage, est considérée comme une nouvelle date de rupture dans le régime hydrologique. Le tableau suivant (Tableau III- 37) présente une comparaison des paramètres hydrologiques avant et après cette mise en service, permettant d'évaluer l'impact de l'infrastructure à travers les indicateurs IHA.

Tableau III- 38: Paramètres des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA)³

Paramètres	Avant impact 1947-1988	Après impact 1989-2021
Facteur de normalisation	1	1
Débit moyen annuel	0,41	0,21
Débit moyen non normalisé	0,41	0,21
Coefficient de variation annuel	3,73	5,59
Prévisibilité du débit	0,38	0,48
Constance du débit / prévisibilité du débit	0,69	0,7
Proportion maximale d'inondations sur une période de 60 jours	0,32	0,31
Durée de la saison sans crues	50	38

III.3.7.5 Magnitude des conditions hydrologiques mensuelles Groupe de Paramètres #1

L'analyse des débits mensuels (Tableau III- 39) de l'Oued Chouly met en évidence une forte diminution des débits après 1989, particulièrement durant la saison humide, avec une chute de plus de 80 % en février. Cette baisse s'accompagne d'une irrégularité accrue des écoulements, même pendant les mois secs.

Tableau III- 40: Débits médians et de leur variabilité #3.1

Paramètres#1	Période avant l'impact 1947-1988				Période après l'impact 1989-2021			
	Médians	CD	Min	Max	Médians	CD	Min	Max
Jan	0,275	1,518	0,1	1,884	0,071	0,9859	0,035	3,9
Fev	0,452	1,313	0,1	3,34	0,078	3,071	0,035	2,742
Mars	0,426	1,434	0,045	2,46	0,1	4,29	0,035	2,16
Avril	0,3773	1,325	0,045	1,95	0,0925	2,347	0,031	0,8044
Mai	0,2496	2,013	0,035	1,88	0,045	0,9556	0,027	0,459
Juin	0,17	1,076	0,027	0,63	0,035	0,8	0,019	0,16
Juill	0,1382	0,6657	0,019	0,53	0,031	0,3871	0,01	0,085
Août	0,0825	1,148	0,019	0,26	0,027	0,2963	0,01	0,057
Sep	0,1	0,895	0,027	0,33	0,027	0,2963	0,01	0,15

Oct	0,1054	0,8706	0,027	0,48	0,035	0,3714	0,019	0,085
Nov	0,17	0,6003	0,035	0,61	0,045	0,8444	0,023	0,28
Déc	0,22	0,675	0,045	0,85	0,057	0,8333	0,023	2,94

L'altération hydrologique est très marquée entre juillet et novembre, avec des indicateurs atteignant des valeurs extrêmes (jusqu'à -1), signalant une sortie complète des conditions naturelles. (Tableau III- 41)

Cette situation résulte de l'effet combiné du changement climatique (baisse des précipitations, hausse des températures) et de la mise en service du barrage El Izdihar en 1988, qui a profondément modifié les dynamiques naturelles du bassin. Ces transformations soulignent la nécessité urgente d'adopter une gestion durable et intégrée des ressources en eau.

Tableau III- 42: Altération hydrologique (RVA)3.1

Paramètres#1	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Jan	0,1757	0,476	-0,8182
Fev	0,3179	0,6991	-0,8182
Mars	0,3438	0,74	-0,5758
Avril	0,2819	0,5635	-0,5455
Mai	0,17	0,49	-0,5981
Juin	0,132	0,2581	-0,9152
Juill	0,0919	0,16	-1
Août	0,06209	0,1048	-1
Sep	0,06817	0,12	-0,9293
Oct	0,0919	0,14	-1
Nov	0,132	0,1881	-1
Déc	0,17	0,2562	-0,9205

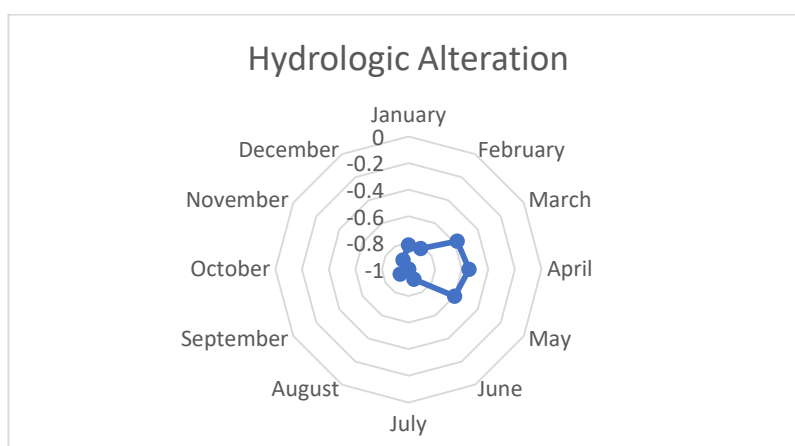


Figure III- 26: L'altération hydrologique observée

III.3.7.6 Les variations des débits mensuels et saisonniers avant et après impact

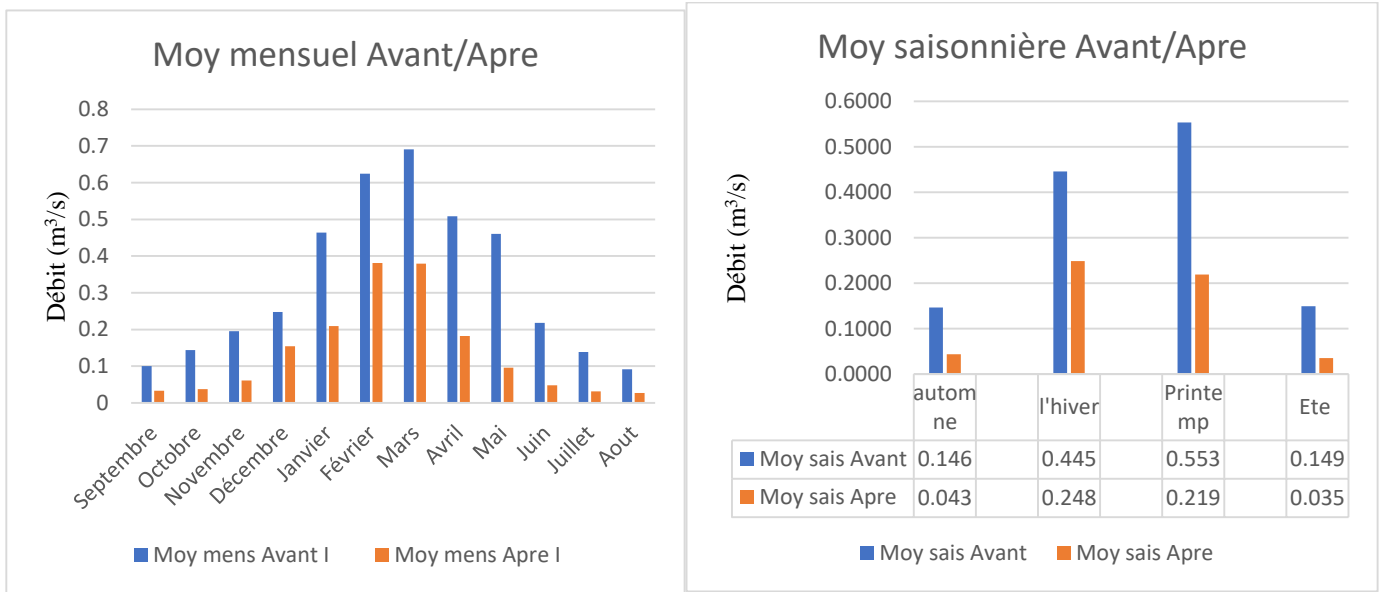


Figure III- 27: Variation saisonnière et mensuelle des débits

L'analyse des débits moyens mensuels et saisonniers avant et après l'impact révèle une diminution significative des écoulements dans le bassin versant de l'Oued Chouly (Figure III- 28).

Débits mensuels

Le graphique montre une diminution marquée des débits mensuels après 1988 pour tous les mois de l'année.

La saison hivernale et printanière (janvier à mai) était la plus productive en eau avant impact, avec des pics atteignant 0,6 à 0,7 m³/s (février–mars).

Après 1988, ces mêmes mois présentent des débits bien plus faibles, ne dépassant généralement pas 0,4 m³/s, avec une chute particulièrement marquée en avril et mai.

Les mois d'étiage (juin à août) montrent également une réduction sévère, avec des débits devenant très bas, parfois inférieurs à 0,05 m³/s. Cette évolution traduit une perte de régularité et une réduction globale de la ressource en eau.

Débits saisonniers

Le graphique saisonnier confirme cette tendance à une baisse généralisée, On constate que la baisse est générale et très prononcée, surtout en été et automne, ce qui confirme une accentuation de l'étiage et un raccourcissement de la période de hautes eaux (Tableau III- 43).

Tableau III- 44: Baisse (%) de moyenne saisonnière

Saison	Moy. Avant impact (m ³ /s)	Moy. Après impact (m ³ /s)	Baisse (%)
Automne	0,1464	0,0439	-70 %
Hiver	0,4455	0,2484	-44 %
Printemps	0,5533	0,2194	-60 %
Été	0,1496	0,0354	-76 %

III.3.7.7 Échelle annuelle

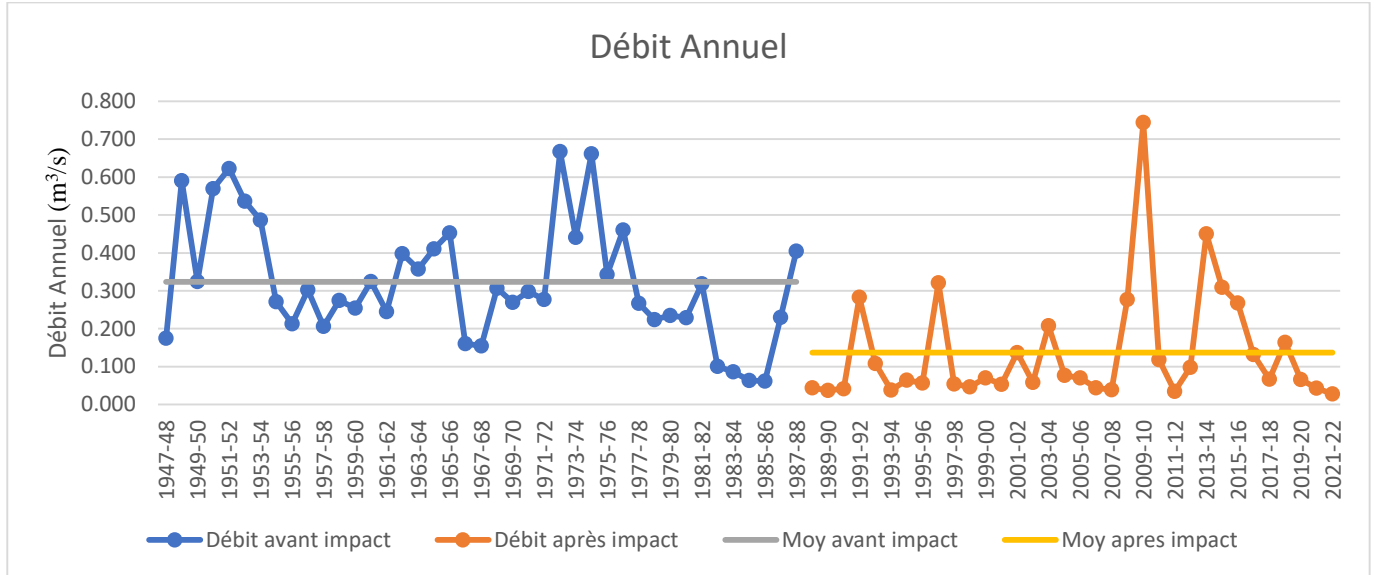


Figure III- 29: L'évolution du débit annuel

Ce graphique montre l'évolution du débit moyen annuel de l'Oued Chouly entre 1947 et 2021, en distinguant les périodes avant et après 1988, année de la mise en service du barrage El Izdihar (Figure III- 30).

Avant 1988, les débits annuels étaient plus élevés et relativement réguliers, avec une moyenne autour de 0,32 m³/s, et des pics atteignant jusqu'à 0,7 m³/s. Cette période correspond à un régime hydrologique naturel, alimenté par des précipitations plus importantes et non perturbé par une régulation artificielle.

Après 1988, on observe une chute nette du débit annuel, avec une moyenne qui tombe à environ 0,18 m³/s, accompagnée de fortes irrégularités d'une année à l'autre. Certains pics (ex. 2009-10) restent élevés, mais ils sont exceptionnels et suivis de valeurs très faibles.

III.3.7.8 Magnitude et durée des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #2

III.3.7.8.1 Débits maximaux

1 et 3 jours max (1947- 1988 /1989-2021)

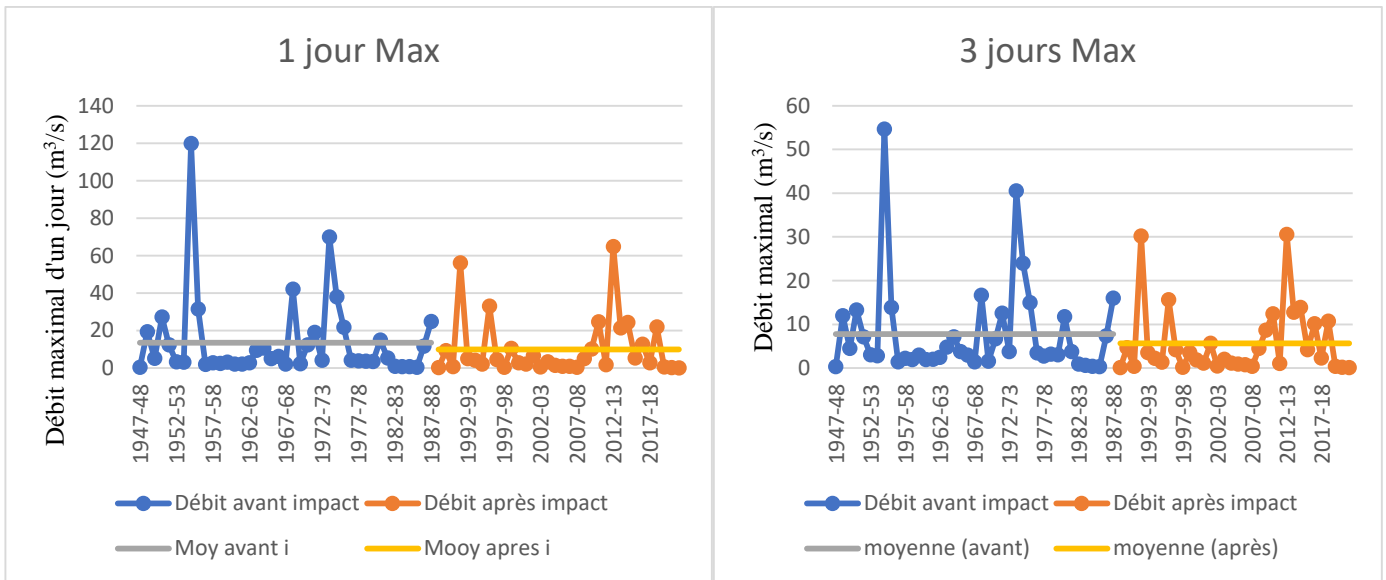


Figure III- 31: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours max)

Avant 1988, les crues extrêmes, tant journalières que sur trois jours, étaient fréquentes et marquées par des pics élevés de débits, souvent dépassant les 100 m³/s. Après 1988, avec la régulation du barrage El Izdihar, ces crues ont considérablement diminué, tant en fréquence qu'en intensité (Figure III- 32).

Les débits maximaux journaliers ont chuté de 16,2 m³/s à 9,32 m³/s, soit une réduction de 42,5%, et ceux sur trois jours ont diminué de 54,63 m³/s à 30,53 m³/s. Bien que les crues soient désormais moins fréquentes et moins intenses, certaines valeurs extrêmes subsistent, ce qui suggère une gestion améliorée mais toujours vulnérable face aux événements hydrologiques potentiellement extrêmes.

7 et 90 jours Max (1947- 1988 /1989-2021)

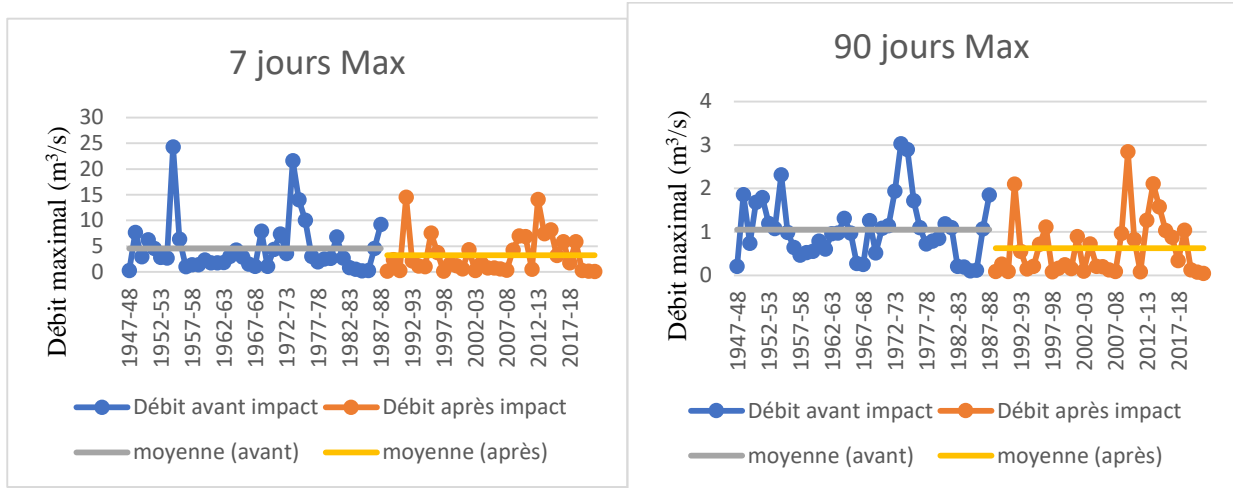


Figure III- 33: Variation interannuelle des débits (7 et 90 jours max)

Les débits maximaux sur 7 jours montrent une réduction notable après 1988, avec moins de pics et une diminution de l'intensité, indiquant une baisse de la fréquence et de l'intensité des crues hebdomadaires. De même, les crues sur 90 jours, fréquentes avant 1988 avec des valeurs supérieures à 2 m³/s, ont considérablement diminué après 1988, avec des valeurs plus faibles et des pics plus rares, signalant une réduction des hautes eaux durables (Figure III- 34).

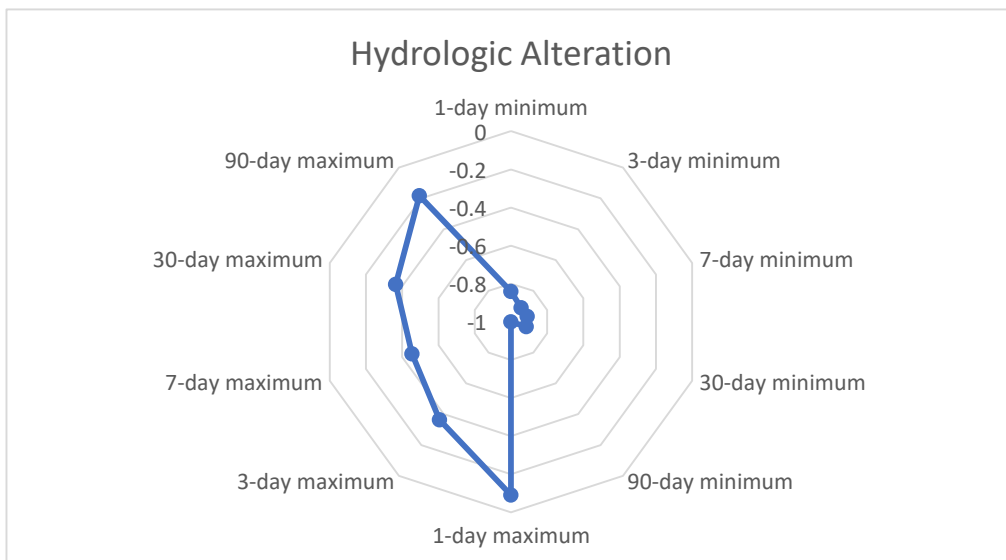


Figure III- 35: L'altération hydrologique observée

III.3.7.8.2 Débits minimaux 1 et 3 jours min (1947-1988 /1989-2021)

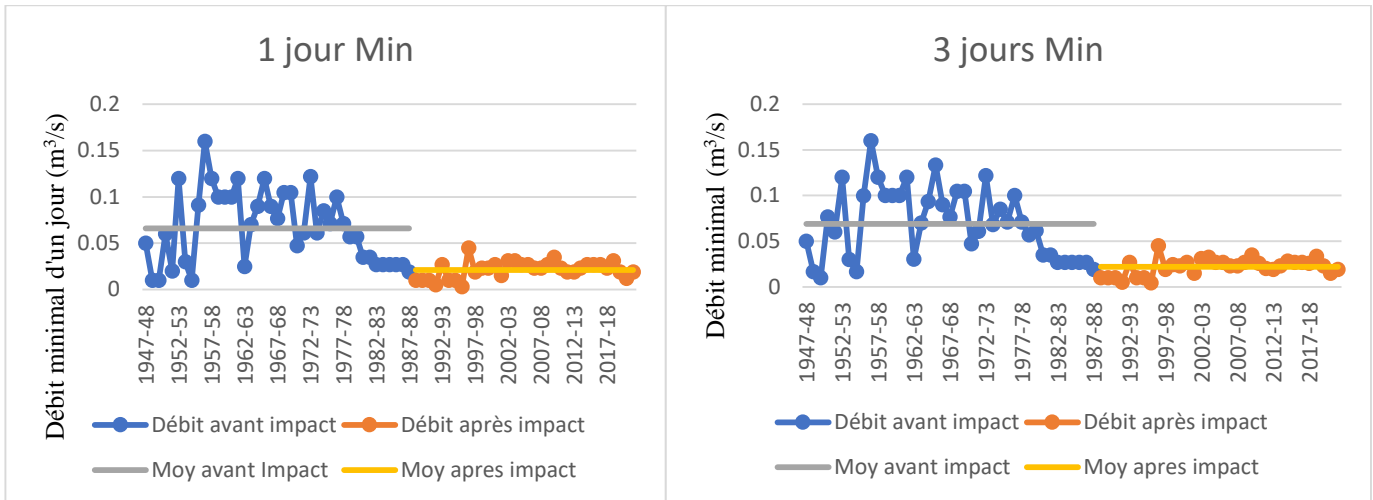


Figure III- 36: Variation interannuelle des débits (1 et 3 jours min)

Le graphique montre l'évolution des débits minimaux sur 1 jour et sur 3 jours consécutifs dans le bassin versant de l'Oued Chouly entre 1947 et 2021. Concernant le débit minimal journalier (1 jour min), avant 1988, les débits présentent une forte variabilité interannuelle, avec plusieurs années dépassant les 0,1 m³/s. Après 1988, les débits diminuent drastiquement, se stabilisant principalement entre 0,005 et 0,03 m³/s, avec très peu d'années affichant des valeurs élevées. Les moyennes avant et après impact montrent une baisse significative, passant d'environ 0,065 m³/s à moins de 0,025 m³/s, soit une diminution de plus de 60 %.

En ce qui concerne le débit minimal moyen sur 3 jours consécutifs, une rupture nette est observée à partir de 1988. Avant cette date, les débits étaient plus élevés et fluctuants, avec des pics dépassant régulièrement 0,1 m³/s. Après 1988, une chute importante des valeurs est constatée, avec des débits se stabilisant entre 0,02 et 0,04 m³/s, accompagnés d'une variabilité beaucoup plus faible. Les moyennes avant et après 1988 confirment cette rupture, montrant que la moyenne des débits minimaux sur trois jours est bien inférieure après 1988.

7 jours min (1947-1988 /1989-2021)

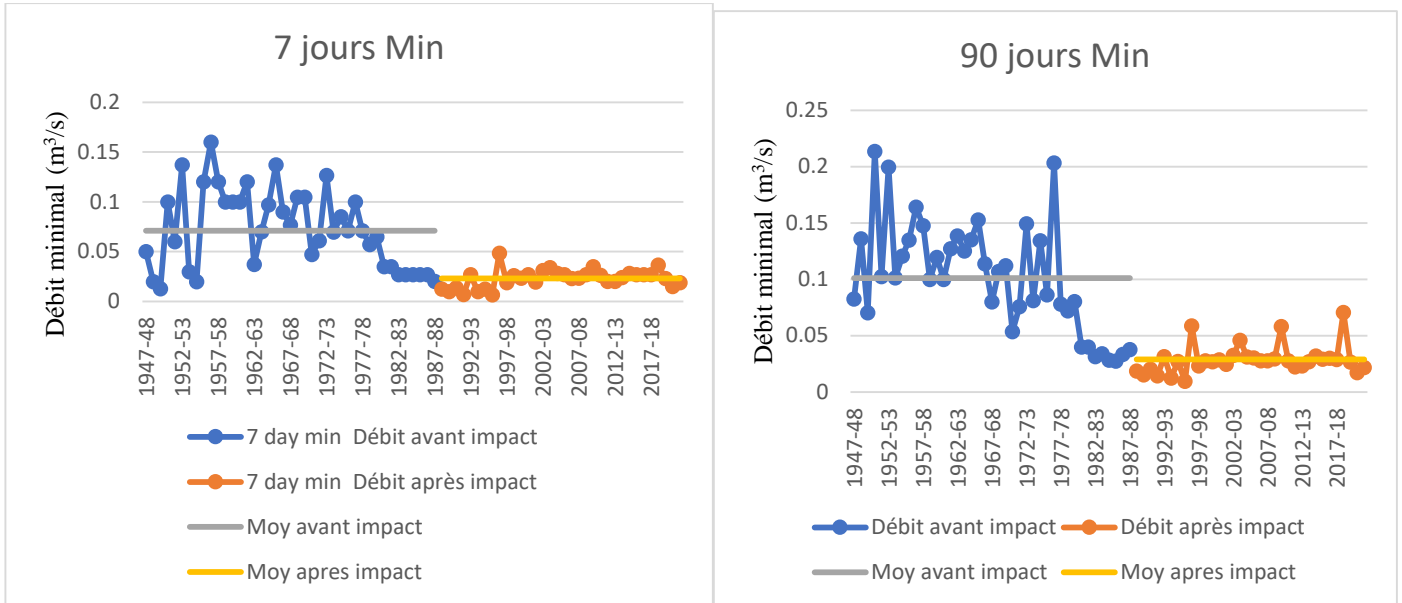


Figure III- 37: Variation interannuelle des débits (3 et 90 jours min)

Le graphique « Débit minimal sur 7 jours » présente l'évolution du débit minimal moyen sur 7 jours consécutifs entre 1947 et 2021 (Figure III- 38), mettant en évidence une rupture nette entre les périodes avant et après 1988. Avant 1988, les débits minimaux sur 7 jours sont plus élevés, souvent supérieurs à $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$, avec des pics pouvant atteindre jusqu'à $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette période est caractérisée par une grande variabilité interannuelle, ce qui reflète un régime hydrologique dynamique et naturel. Après 1988, les débits minimaux chutent de manière significative, se stabilisant entre $0,02$ et $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$, avec une variabilité fortement réduite, indiquant une régulation marquée du régime d'étiage. Les lignes de moyenne confirment cette tendance, montrant une diminution claire des débits après 1988, illustrant une baisse persistante des débits sur 7 jours consécutifs.

Concernant le débit minimal sur 90 jours consécutifs, le graphique montre une chute notable après 1988. Avant cette date, les débits étaient plus élevés et variables, atteignant fréquemment des valeurs entre $0,10$ et $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui reflète un régime naturel stable et bien alimenté. Après 1988, les débits se stabilisent autour de $0,02$ à $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, avec des fluctuations minimales. La comparaison des lignes de moyenne avant et après 1988 met en évidence une baisse durable de la base des écoulements sur 90 jours, illustrant un affaiblissement structurel de l'étiage long dans le bassin.

D'après les tableaux, depuis 1989, l'analyse des débits maximaux sur différentes durées (1, 3, 7 et 90 jours) montre une tendance claire à la baisse, surtout pour les crues prolongées. Par exemple, si le débit de pointe sur un jour reste à peu près stable, sa valeur maximale a chuté de $119,8$ à $64,82 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour les crues étalées sur 90 jours, la baisse est encore plus marquée : près de 73 %, passant de $0,97$ à $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. En parallèle, on observe une augmentation du coefficient de dispersion, signe d'une plus grande variabilité dans les débits et donc d'une plus grande difficulté à anticiper les crues.

Côté débits minimaux, la tendance est également à la baisse. Les médianes ont fortement diminué après 1989, notamment pour les périodes de 1 jour (de 0,061 à 0,023 m³/s) et 90 jours (de 0,100 à 0,028 m³/s). Contrairement aux crues, ces faibles débits deviennent plus réguliers, mais les valeurs absolues atteignent parfois des niveaux très bas, laissant présager des périodes de très faible écoulement, voire d'assèchement. Cela pose un risque direct pour la biodiversité aquatique et la qualité de l'eau.

Les résultats obtenus avec la méthode RVA (Tableau III- 45) confirment ces tendances : l'altération des crues est modérée à forte, avec des indices négatifs allant jusqu'à -0,45 pour les crues de 7 jours, et -0,18 pour celles de 90 jours. Cela signifie que les crues sont non seulement moins fréquentes, mais aussi moins intenses et moins fidèles au régime naturel.

Les débits d'étiage, eux, sont encore plus touchés. Les indices d'altération sont critiques, atteignant même -1 pour les 90 jours minimum, et dépassant -0,9 pour les périodes de 3, 7 et 30 jours. Cette situation reflète une forte dégradation du régime d'étiage depuis la mise en service du barrage. En retenant l'eau durant la saison humide, celui-ci empêche une recharge suffisante de l'oued en saison sèche, accentuant ainsi les périodes de pénurie.

Tableau III- 46: Débits médians et de leur variabilité #3.2

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1988				Période après l'impact 1989-2021			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
1 jour Min	0,0611	1,195	0,01	0,16	0,023	0,4348	0,003	0,045
3 jours Min	0,06913	1,023	0,01	0,16	0,023	0,4348	0,004333	0,045
7 jours Min	0,06991	1,012	0,01257	0,16	0,02414	0,3314	0,006857	0,04843
30 jours Min	0,07376	0,9554	0,0172	0,1747	0,02607	0,3453	0,009333	0,05393
90 jours Min	0,1007	0,6836	0,01862	0,2136	0,0278	0,2844	0,009633	0,07068
1 jour Max	4,14	3,313	0,132	119,8	4,088	2,63	0,057	64,82
3 jours Max	3,305	2,978	0,1147	54,63	2,279	3,768	0,057	30,53
7 jours Max	2,723	1,796	0,1063	24,25	1,609	3,298	0,05043	14,52
30 jours Max	1,538	1,063	0,1015	6,809	0,6508	3,015	0,04313	5,083
90 jours Max	0,9697	0,7769	0,08814	3,027	0,2581	3,397	0,03856	2,839

Tableau III- 47: Altération hydrologique (RVA)3.2

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
1 jour Min	0,035	0,09	-0,8409
3 jours Min	0,03732	0,0927	-0,9091
7 jours Min	0,03922	0,09946	-0,9091
90 jours Min	0,0785	0,1244	-1
1 jour Max	2,826	11,49	-0,09091
3 jours Max	2,488	7,018	-0,3636
7 jours Max	1,767	4,323	-0,4545

90 jours Max	0,6553	1,132	-0,1818
---------------------	--------	-------	---------

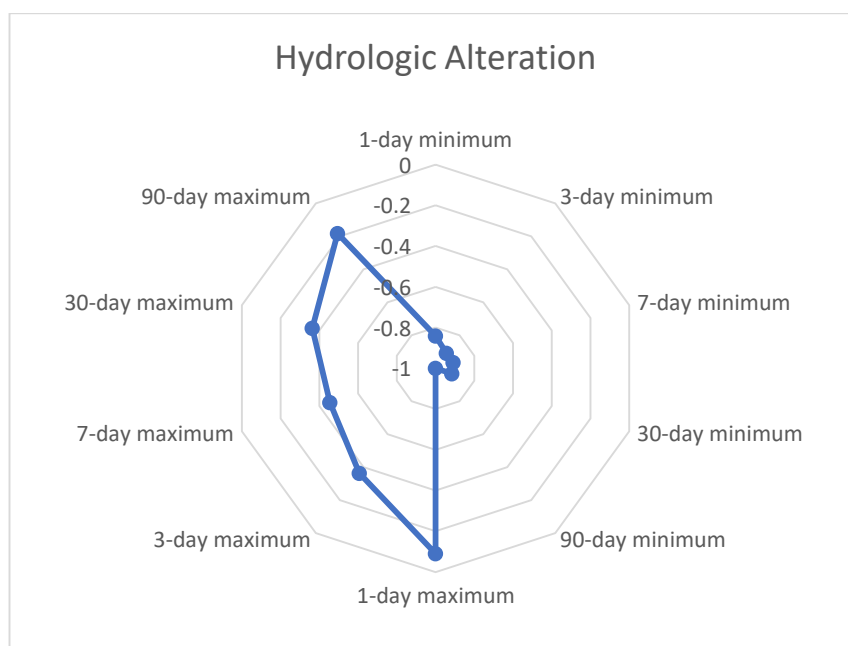


Figure III- 39: L'altération hydrologique observée #3.3

III.3.7.9 Période des conditions hydrologiques extrêmes Groupe de Paramètres #3

III.3.7.9.1 Analyse des dates des débits extrêmes

L'analyse des dates du débit minimal et maximal révèle un décalage temporel entre les deux périodes étudiées.

Pour les débits minimaux, la médiane passe du 226,5^e jour (environ mi-août) à 217^e jour (début août), ce qui reste relativement stable. La variabilité reste également faible, avec un coefficient de dispersion de 0,127 → 0,1216.

En revanche, la date du débit maximal évolue plus sensiblement : elle passe du 43^e jour (début février) à 69^e jour (début mars) (Tableau III- 48).

Tableau III- 49: Débits médians et de leur variabilité #3.3

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1988				Période après l'impact 1989-2021			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Date du débit minimal	226,5	0,127	3	319	217	0,1216	75	277
Date du débit maximal	43	0,235	1	366	69	0,2036	5	350

D'après les résultats du (Tableau III- 50) relatifs aux indices RVA :

L'altération hydrologique pour la date du débit minimal est faible (-0,125), indiquant une relative stabilité du moment d'étiage.

En revanche, la date du débit maximal montre une altération positive de 0,2727, traduisant un glissement du pic vers des périodes plus tardives que la plage naturelle (42–112 jours).

Ce décalage peut s'expliquer par un retard dans les apports en eau liés au changement climatique (chutes de pluies plus tardives ou plus concentrées), ou bien par une modulation des crues par le barrage, qui tend à lisser les pics naturels.

Tableau III- 51: Altération hydrologique (RVA)3.3

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Date du débit minimal	210	236	-0,125
Date du débit maximal	42,38	112	0,2727

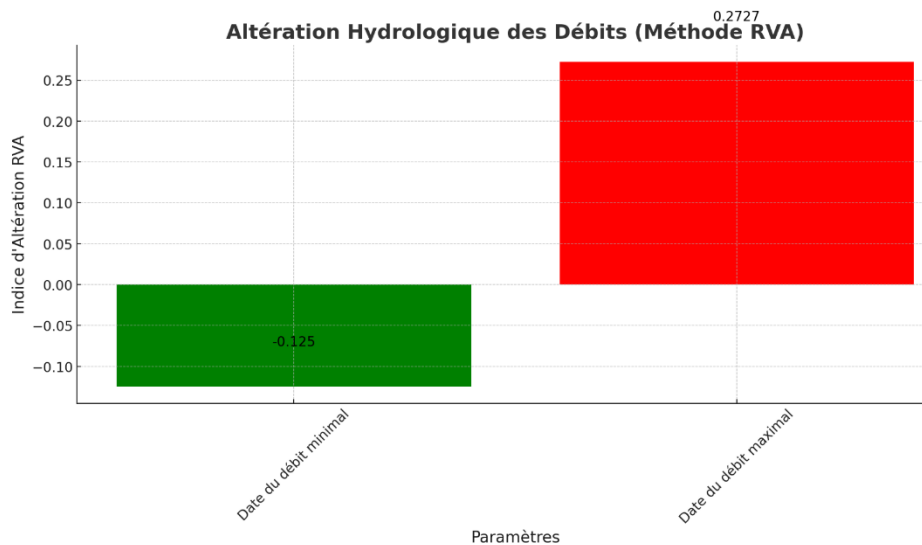


Figure III- 40: Altération hydrologique observée des Débits (RVA)

III.3.7.10 Fréquence et durée des impulsions hydrologiques Groupe de Paramètres #4

III.3.7.10.1 Analyse des impulsions de faible et de fort débit

L'analyse (Tableau III- 52) met en évidence des changements significatifs dans la fréquence et la durée des impulsions :

Le nombre d'impulsions de faible débit est passé de 2 à 4 par an, tandis que leur durée a plus que triplé (de 5,75 à 19,5 jours en médiane).

À l'inverse, le nombre d'impulsions de fort débit diminue légèrement (de 3 à 2), mais c'est surtout leur durée qui est affectée : de 9,5 à 4,5 jours, soit une division par deux.

Ces changements traduisent une augmentation des périodes d'étiage plus longues et plus fréquentes, et une réduction de la durée des événements de haut débit, qui deviennent donc plus rares et plus brefs

Tableau III- 53: Débits médians et de leur variabilité #3.4

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1988				Période après l'impact 1989-2021			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Nombre d'impulsions de faible débit	2	2	0	12	4	0,75	0	10
Durée des impulsions de faible débit	5,75	4,826	1	102	19,5	3,385	0	394
Nombre d'impulsions de fort débit	3	1,333	0	10	2	1,5	0	6
Durée des impulsions de fort débit	9,5	2,632	1	140	4,5	1,806	0	59
Seuil des impulsions de faible débit	-	-	0,1	-	-	-	-	-
Seuil des impulsions de fort débit	-	-	0,41	-	-	-	-	-

Les valeurs d'altération hydrologique calculées via la méthode RVA (Tableau III- 54) confirment :

- Une altération modérée pour le nombre d'impulsions de faible débit (0,1136)
- Une altération moyenne à forte pour la durée des faibles débits (0,4848)
- Une altération modérée pour le nombre d'impulsions de fort débit (0,2727)
- Une altération faible pour leur durée (0,09091)

On constate donc une dégradation plus marquée des conditions de faible débit, ce qui reflète un affaiblissement de la dynamique naturelle des crues et des étiages.

Tableau III- 55: Altération hydrologique (RVA)3.4

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Nombre d'impulsions de faible débit	1	3,81	0,1136
Durée des impulsions de faible débit	3	25,54	0,4848

Nombre d'impulsions de fort débit	2	4	0,2727
Durée des impulsions de fort débit	5	20,96	0,09091

Remarque

L'évolution des impulsions de débit révèle une tendance vers une hydrologie plus stable mais moins naturelle, dominée par des périodes prolongées de faibles débits, et des crues devenues plus rares et plus courtes.

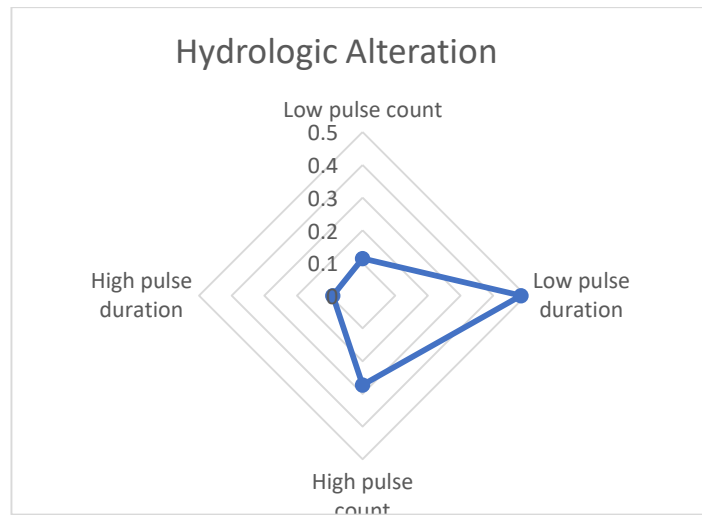


Figure III- 41: Altération hydrologique observée

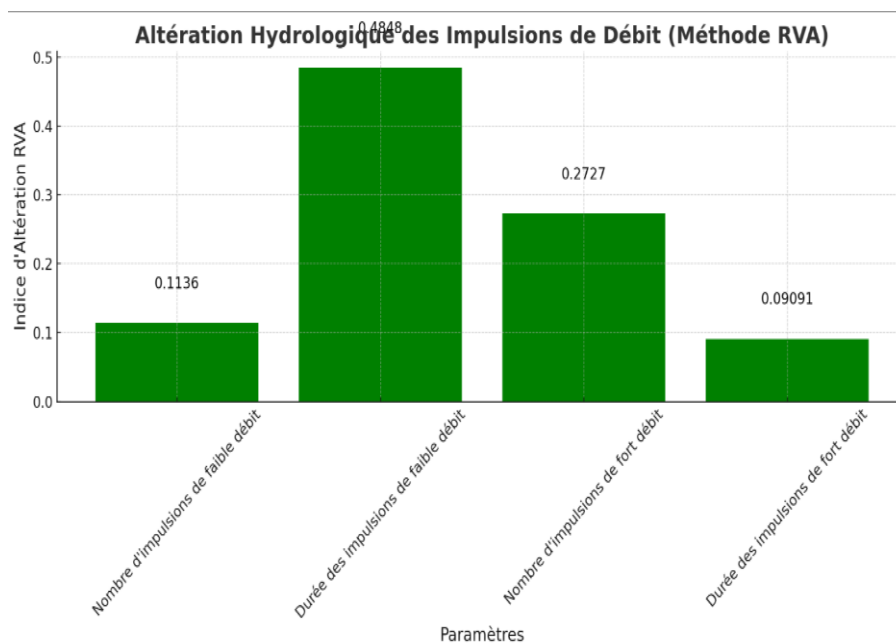


Figure III- 42: Altération hydrologique observée (RVA)

III.3.7.11 Taux et fréquence des variations hydrologiques Groupe de Paramètres #5

III.3.7.11.1 Analyse des taux de variation du débit et des inversions hydrologiques

Le taux de montée du débit a été significativement réduit après 1989, passant d'une médiane de 0,02726 à 0,012, soit une diminution de plus de 55 %. Cela signifie que les crues sont devenues moins brutales et plus progressives.

Le taux de descente du débit passe de -0,0395 à -0,015, ce qui indique aussi une descente plus lente des débits, probablement due à la régulation artificielle des écoulements.

Le nombre d'inversions hydrologiques (changements de tendance entre montée et descente du débit) a augmenté de 50,5 à 69 par an, signe d'une variabilité journalière plus marquée, probablement liée à une gestion irrégulière des lâchers d'eau du barrage ou à des régimes pluviométriques plus instables. (Voir Figure III- 43)

Figure III- 44: Débits médians et de leur variabilité #3.5

Paramètres	Période avant l'impact 1947-1988				Période après l'impact 1989-2021			
	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum	Médianes	Coeff de dispersion	Minimum	Maximum
Taux de montée du débit	0,02726	1,1	0,009	0,15	0,012	0,3333	0,004	0,1047
Taux de descente du débit	-0,0395	-0,7152	-0,1	-0,009	-0,015	-0,6333	-0,04	-0,004
Nombre d'inversions hydrologiques	50,5	0,4703	11	110	69	0,4565	32	115

Les indices RVA révèlent des altérations hydrologiques notables (Tableau III- 56) :

- **Taux de montée** : altération très forte (-0,9091)
- **Taux de descente** : altération forte (-0,6023)
- **Inversions hydrologiques** : altération modérée à forte (-0,4545)

Ces résultats traduisent une rupture dans la dynamique naturelle des écoulements, perturbant le comportement saisonnier du cours d'eau

Tableau III- 57: Altération hydrologique (RVA)3.5

Paramètres	Limites RVA		Altération hydrologique
	Basse	Élevée	
Taux de montée du débit	0,02067	0,04	-0,9091
Taux de descente du débit	-0,04	-0,02757	-0,6023

Nombre d'inversions hydrologiques	46,38	58,81	-0,4545
--	-------	-------	---------

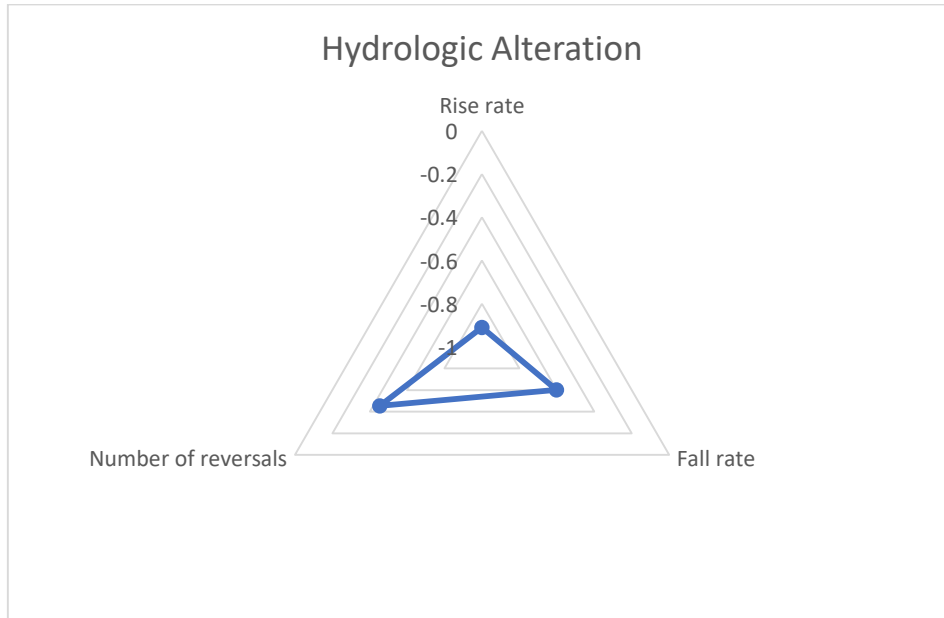


Figure III- 45: Altération hydrologique observée

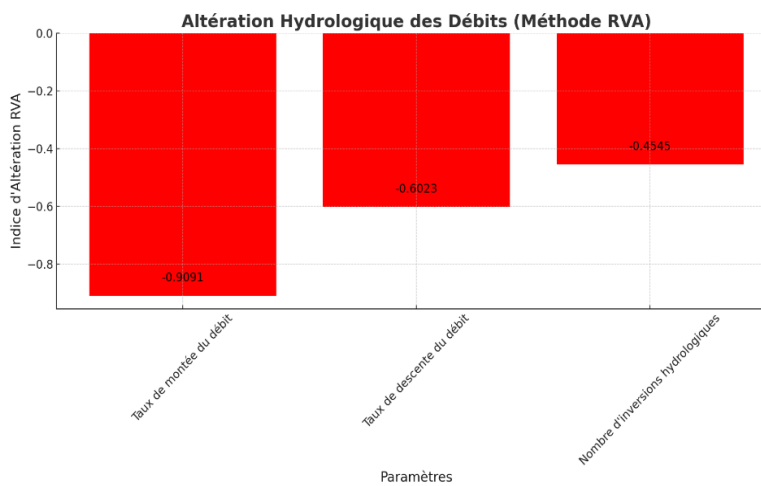


Figure III- 46: Altération hydrologique observée (RVA)

III.3.8 Indicateurs de Magnitude et de Variabilité des Apports Hydrologiques

Le calcul des indicateurs sera effectué pour les périodes 1947–1988 et 1989–2021, en prenant comme date de référence la mise en eau du barrage en 1988.

III.3.8.1 Magnitude des apports annuels (IHA1)

Cet indicateur compare la moyenne annuelle des apports dans le régime altéré (QAA) à celle du régime naturel (QAN).

Il est calculé selon la formule :

$$IHA1 = \frac{QAA}{QAN} = \frac{0,13677}{0,3237} = 0,42 \quad (22)$$

$IHA1 < 1$ → traduit une diminution des apports annuels, indiquant une réduction des ressources en eau disponibles.

III.3.8.2 Magnitude des apports mensuels (IHA2)

Cet indicateur compare la moyenne mensuelle des débits dans le régime altéré (QMA) à celle du régime naturel (QMN).

Il est défini par la relation :

$$IHA2 = \frac{QMA}{QMN} \quad (23)$$

Tableau III- 58: Valeurs mensuels IHA2

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
QMN	0,100	0,143	0,195	0,247	0,464	0,624	0,691	0,508	0,460	0,217	0,1389	0,092
QMA	0,032	0,0377	0,061	0,154	0,209	0,381	0,378	0,182	0,096	0,0482	0,03120	0,026
IHA2	0,328	0,26	0,312	0,624	0,451	0,610	0,548	0,35	0,209	0,22	0,2245	0,2921

$IHA2 < 1$ → diminution des débits mensuels moyens, traduisant une baisse des précipitations ou une surexploitation des ressources en eau.

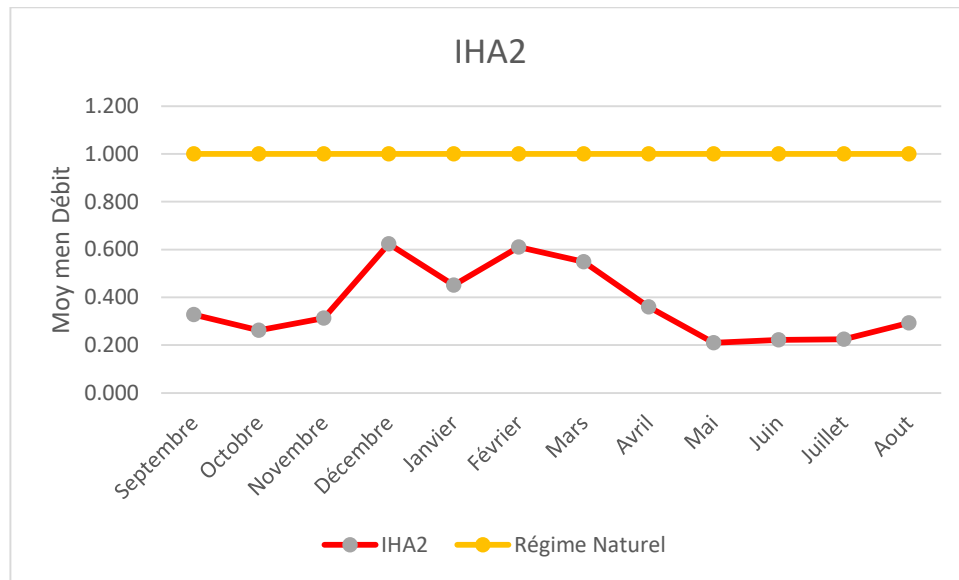


Figure III- 47: Graphe IHA2

L'indicateur IHA2, calculé pour la période d'étude, montre des valeurs inférieures à 1 pour l'ensemble des mois, ce qui indique une réduction générale des débits mensuels moyens par rapport au régime naturel. Cette diminution peut s'expliquer par une baisse des précipitations ou une surexploitation des ressources en eau. Les mois de septembre, août et mai affichent les diminutions les plus marquées, traduisant une vulnérabilité hydrologique accrue en période sèche.

III.3.8.3 Variabilité normale des apports (IHA3)

Cet indicateur mesure la dispersion des débits en comparant la différence entre le 10^e percentile (Q10) et le 90^e percentile (Q90) des apports hydrologiques dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA3 = \frac{(Q10 - Q90)_{ALT}}{(Q10 - Q90)_{NAT}} = \frac{0,027 - 0,25}{0,0573 - 0,739} = 0,327 \quad (24)$$

$IHA3 < 1 \rightarrow$ diminution de la variabilité des débits, indiquant une régularisation accrue des écoulements, souvent due à la présence de barrages ou de retenues d'eau.

III.3.8.4 Variabilité extrême des apports (IHA4)

Cet indicateur évalue les fluctuations extrêmes des débits en comparant la différence entre les débits mensuels maximal (QmaxT) et minimal (QminT) dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA4 = \frac{(Q_{maxT} - Q_{minT})_{ALT}}{(Q_{maxT} - Q_{minT})_{NAT}} \quad (25)$$

$$IHA4 = \frac{0,38108 - 0,02688}{0,69102 - 0,09201} = 0,59 \quad (26)$$

$IHA4 < 1 \rightarrow$ atténuation des fluctuations extrêmes, souvent liée à des aménagements hydrauliques réduisant l'impact des crues et des étiages.

III.3.8.5 Saisonnalité maximale (IHA5)

Cet indicateur évalue la régularité des crues maximales en comparant la différence entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA5 = 1 - \frac{Gapmax}{6} \quad (27)$$

Où $Gapmax$ est la moyenne des écarts entre les séries mensuelles maximales du régime altéré et du régime naturel pour chaque année.

$$Gapmax = | \text{Mois moyen max (altéré)} - \text{Mois moyen max (naturel)} |$$

$$Gapmax = | 3,61 - 3,73 | = 0,1140$$

$$IHA5 = 1 - \frac{0,1140}{6} = 0,98 \quad (28)$$

IHA5 proche de ≈ 1 \rightarrow faible altération de la saisonnalité des crues maximales, indiquant une préservation du régime naturel.

III.5 Saisonnalité minimale (IHA6)

Cet indicateur mesure la régularité des étiages en comparant la différence entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA6 = 1 - \frac{Gapmin}{6} \quad (29)$$

Où $Gapmin$ est la moyenne des écarts entre les séries mensuelles minimales du régime altéré et du régime naturel pour chaque année.

$$Gapmax = | \text{Mois moyen min (altéré)} - \text{Mois moyen min (naturel)} |$$

$$Gapmax = | 8,090 - 8,829 | = 0,738$$

$$IHA5 = 1 - \frac{0,738}{6} = 0,877 \quad (30)$$

IHA6 proche de ≈ 1 \rightarrow stabilité des débits minimaux dans le temps, préservant le cycle hydrologique naturel.

III.3.8.7 Magnitude des crues normales (IHA7)

Cet indicateur compare l'intensité des crues normales entre les régimes altéré et naturel :

$$IHA7 = \frac{(Q5)^{NAT}}{(Q5)^{ALT}} \quad (31)$$

Où $Q5$ représente le 5^e centile des apports en eau dans les régimes altéré et naturel.

$$IHA7 = \frac{0,035}{0,019} = 1,84 \quad (32)$$

$IHA7 > 1$ → augmentation de la magnitude des crues normales sous l'effet d'interventions anthropiques ou climatiques.

III.3.8.8 Variabilité des crues normales (IHA8)

Cet indicateur évalue la variabilité des crues normales en comparant le coefficient de variation des apports en eau dans les régimes altéré et naturel :

$$IHA8 = \frac{(Cv5)^{NAT}}{(Cv5)^{ALT}} \quad (33)$$

Où Cv5 est le coefficient de variation (m/s) des séries de crues supérieures à Q5 dans les régimes altéré et naturel.

$$CVnat = \frac{\text{l'écart-type}}{\text{la moyenne}} = \frac{0,525}{0,592} = 0,886 \quad (34)$$

L'écart-type et la moyenne des débits supérieurs à (Q5) NAT

$$CValt = \frac{0,383}{0,145} = 2,641 \quad (35)$$

L'écart-type et la moyenne des débits supérieurs à (Q5) ALT

$$IHA8 = \frac{0,886}{2,641} = 0,335 \quad (36)$$

$IHA8 < 1$ → diminution de la variabilité des crues normales, pouvant être due à une régulation excessive des écoulements.

III.3.8.9 Saisonnalité des crues (IHA9)

Cet indicateur mesure la régularité saisonnière des crues en comparant le nombre d'années où les débits mensuels moyens dépassent le seuil des crues normales dans les régimes naturel et altéré :

$$IHA9 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \max(0, 5 - |i_{fldNAT, m} - i_{fldALT, m}|) \quad (37)$$

- $i_{fldNAT, m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MN} du mois m est supérieur au débit de crue normal Q_5 dans le régime naturel,
- $i_{fldALT, m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen Q_{MA} du mois m est supérieur à Q_5 dans le régime altéré

Voici les étapes pour le calcul de IHA9 :

1. La fonction $(5 - |i_{fldNAT, m} - i_{fldALT, m}|)$ pour chaque mois

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i_fldNAT	41	41	41	41	41	40	37	33	31	37	41	41
i_fldALT	34	34	34	34	34	32	26	26	28	32	34	34
 i_fldNAT - i_fldALT 	7	7	7	7	7	8	11	7	3	5	7	7
 (5 - NAT-ALT) 	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-6	-2	2	0	-2	-2

2. La fonction ($\max(0, 5 - |i_fldNAT, m - i_fldALT, m|)$) pour chaque mois : Pour chaque valeur de la ligne précédente, si elle est négative, on remplace par 0.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
($\max(0, 5 - NAT-ALT)$)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

3. Sommer les 12 valeurs obtenues à l'étape 2 : ($0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 2 + 0 + 0 + 0 = 2$)

$$IHA9 = \frac{2}{12} = \frac{1}{6} \approx 0,167 \quad (38)$$

IHA9 proche de ≈ 0 → perturbation importante de la saisonnalité des crues.

III.3.8.10 Magnitude des sécheresses normales (IHA10)

Cet indicateur compare l'intensité des sécheresses normales entre les régimes naturel et altéré :

$$IHA10 = \frac{(Q95)^{NAT}}{(Q95)^{ALT}} \quad (39)$$

Où Q95 représente le 95^e centile des apports en eau dans les régimes altéré et naturel.

$$IHA10 = \frac{1,05}{0,459} = 2,28 \quad (40)$$

IHA10 > 1 → augmentation des débits en période de sécheresse, indiquant une possible gestion active du flux d'eau.

III.2.8.11 Variabilité des sécheresses normales (IHA11)

Cet indicateur évalue la fluctuation des sécheresses normales en comparant le coefficient de variation des apports d'eau en période de sécheresse :

$$IHA11 = \frac{(Cv95)^{NAT}}{(Cv95)^{ALT}} \quad (41)$$

Où Cv_{95} est le coefficient de variation (m/s) des séries de débits inférieurs à Q_{95} dans les régimes altéré et naturel.

$$IHA11 = \frac{1,119}{1,1061} = 1,011 \quad (42)$$

$IHA11 > 1 \rightarrow$ augmentation de la variabilité des sécheresses normales, suggérant une plus grande imprévisibilité du régime hydrologique.

III.3.8.12 Saisonnalité des sécheresses (IHA12)

Cet indicateur mesure la régularité saisonnière des sécheresses en comparant le nombre d'années où les débits mensuels moyens tombent sous le seuil des sécheresses normales dans les régimes naturel et altéré :

$$IHA12 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \max(0, 5 - |i_{drNAT, m} - i_{drALT, m}|) \quad (43)$$

Où :

- m représente le mois de l'année,
- $i_{drNAT, m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen QMN du mois m est inférieur au débit de sécheresse normal Q_{95} dans le régime naturel,
- $i_{drALT, m}$ est le nombre d'années où le débit mensuel moyen QMA du mois m est inférieur à Q_{95} dans le régime altéré.

Voici les étapes pour le calcul de IHA12 :

1. La fonction $(5 - |i_{fldNAT, m} - i_{fldALT, m}|)$ pour chaque mois :

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$i_{drNAT, m}$	36	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
$i_{drALT, m}$	33	0	34	0	34	0	34	0	34	0	34	0
$ i_{drNAT, m} - i_{drALT, m} $	3	41	7	41	7	41	7	41	7	41	7	41
$ (5 - NAT-ALT) $	2	-36	-2	-36	-2	-36	-2	-36	-2	-36	-2	-36

1. la fonction $(\max(0, 5 - |i_{drNAT, m} - i_{drALT, m}|))$ pour chaque mois : Pour chaque valeur de la ligne précédente, si elle est négative, on remplace par 0.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$(\max(0, 5 - NAT-ALT))$	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. **Sommer les 12 valeurs obtenues à l'étape 2 :** (2 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 2)

$$IHA9 = \frac{2}{12} = \frac{1}{6} \approx 0,167 \quad (44)$$

IHA12 proche de ≈ 0 → perturbation importante de la saisonnalité des sécheresses.

III.1 Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA)

Un indicateur global d'altération hydrologique (GIHA) est calculé comme la moyenne des douze indicateurs IHA :

$$GIHA = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} IHAi \quad (45)$$

Où IHAi représente l'indicateur d'altération hydrologique pour chaque paramètre i.

IHA1	IHA2	IHA3	IHA4	IHA5	IHA6	IHA7	IHA8	IHA9	IHA10	IHA11	IHA12
0,42	0,37	0,32	0,59	0,98	0,87	1,84	0,33	1,16	2,28	1,01	1,16

GIHA

$$= \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} IHAi = 0,42 + 0,37 + 0,32 + 0,59 + 0,98 + 0,87 + 1,84 + 0,33 + 1,16 + 2,28 + 1,01 + 1,16$$

$$GIHA = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} IHAi = 11,33 \quad (46)$$

Diviser la somme par 12 :

$$GIHA = \frac{1}{12} \times 11,33 = 0,944 \quad (47)$$

Afin d'évaluer le degré d'altération du régime hydrologique du cours d'eau étudié, l'Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA) a été calculé. Cet indicateur est obtenu en faisant la moyenne des douze indicateurs IHA (Indicateurs d'Altération Hydrologique), chacun représentant un paramètre spécifique du régime des débits (valeurs extrêmes, durée, fréquence, timing, etc.). Les valeurs obtenues pour les IHA varient entre 0,32 et 2,28, traduisant des niveaux d'altération variables selon les paramètres. La somme totale des IHA est de 11,38, ce qui donne un GIHA de 0,944.

Ce résultat indique une altération hydrologique modérée à forte du régime naturel du cours d'eau. Un GIHA proche de 1 signifie que le régime hydrologique présente des perturbations notables, susceptibles d'avoir des effets sur les processus écosystémiques, la continuité écologique et les usages anthropiques de la ressource en eau. Ce niveau d'altération peut être

attribué à des facteurs tels que la régulation artificielle du débit (notamment depuis la mise en eau du barrage en 1988), les changements climatiques, ou encore les modifications de l'occupation du sol dans le bassin versant.

Chapitre IV : Discussion

IV.1 Comparaison des débits

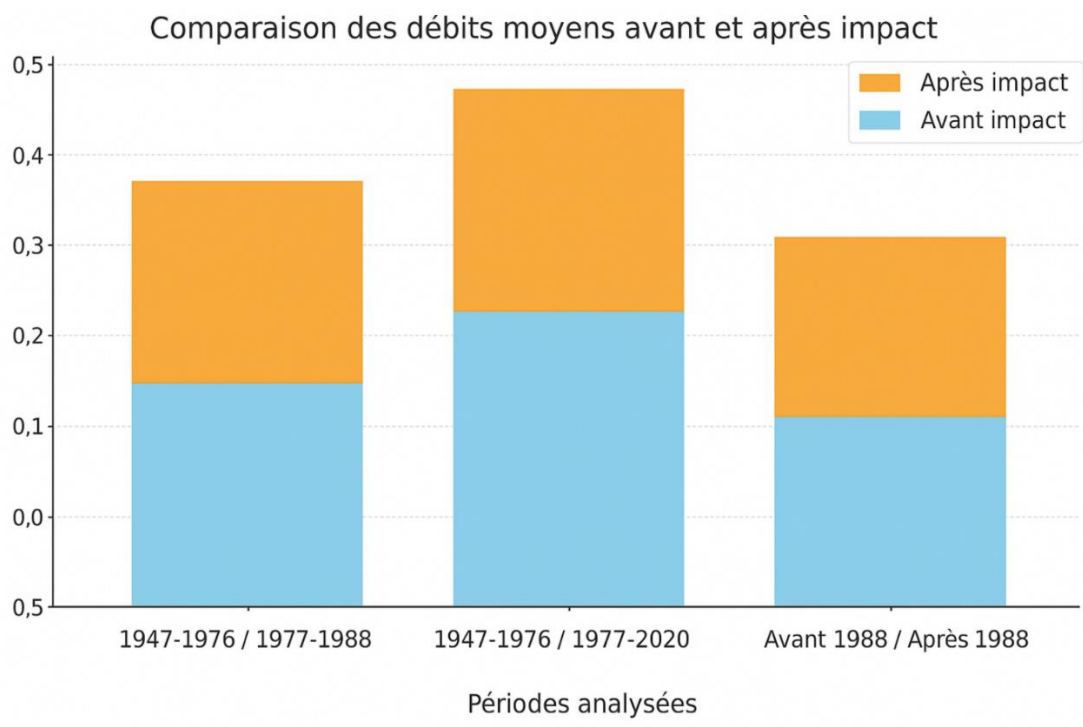


Figure IV- 1: Comparaison des débits avant et après impact

IV.2 Évolution du régime hydrologique entre 1947 et 2021 : une altération progressive et structurante

L'analyse des séries de débits annuels couvrant la période de 1947 à 2022 met en évidence une altération nette et progressive du régime hydrologique, résultant de l'impact conjugué du changement climatique et des interventions humaines, en particulier la construction et la mise en eau du barrage en 1988.

Entre 1947 et 1976, les débits présentent une variabilité naturelle, oscillant autour d'une moyenne relativement stable. Ce comportement reflète un régime hydrologique encore largement préservé, fidèle aux conditions naturelles et peu influencé par les activités humaines. Toutefois, à partir de 1977 et jusqu'en 1988, on observe une baisse progressive des débits sur l'ensemble, signe d'une altération climatique du régime des eaux. Cette évolution s'explique principalement par la diminution des précipitations.

Lorsqu'on étend l'analyse à la période 1947–2020, l'altération apparaît encore plus marquée. Les données postérieures à 1977 révèlent une chute significative et durable des débits moyens, confirmant l'effet combiné du climat et de l'aménagement hydraulique. Le bassin est alors soumis à une double pression : la raréfaction de la ressource naturelle et les perturbations provoquées par les infrastructures hydrauliques.

Enfin, la comparaison entre les périodes avant et après 1988, année de la mise en eau du barrage, révèle une rupture nette dans le régime hydrologique. Avant cette date, malgré une tendance à la baisse, les écoulements restent relativement réguliers. Après 1988, les débits

enregistrés chutent brutalement, avec une moyenne qui passe sous les 0,20 m³/s, traduisant une altération structurelle du régime. Le barrage agit ici comme un régulateur artificiel, modifiant en profondeur les dynamiques naturelles des écoulements et réduisant considérablement les volumes restitués en aval.

L'évolution des débits entre 1947 et 2022 permet de distinguer trois grandes phases d'altération du régime hydrologique :

- 1947–1976 : régime naturel globalement stable ;
- 1977–1988 : altération progressive due au changement climatique ;
- 1988–2022 : altération brutale et persistante après la mise en eau du barrage.

Ces résultats soulignent l'importance de mettre en place une gestion intégrée et durable des ressources en eau, capable de répondre aux défis climatiques tout en limitant les impacts des aménagements sur les milieux aquatiques (Tableau IV- 1).

Tableau IV- 2: Nature de l'impact, Taux de réduction du débit (%)

Période analysée	Moyenne débit avant (m ³ /s)	Moyenne débit après (m ³ /s)	Nature de l'impact	Type d'altération	Taux de réduction du débit (%)
1947–1976 / 1977–1988	0,39	0,23	Changement climatique	Progressive	41
1947–1976 / 1977–2020	0,48	0.18	Changement climatique + construction du barrage	Progressive et durable	62,5
Avant 1988 / Après 1988	0,33	0.14	Mise en eau du barrage	Brutale et structurelle	57,6

IV.3 Comparaison des moyennes saisonnières

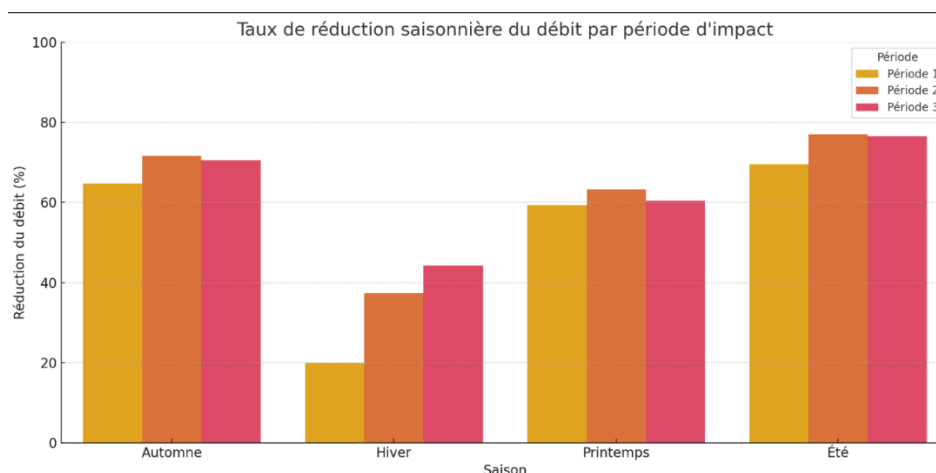


Figure IV- 2: Taux de réduction saisonnière du débit par période d'impact

IV.4 Analyse des débits saisonniers avant et après impact : une altération progressive et contrastée

L'analyse comparative des débits moyens saisonniers (Tableau IV- 3), avant et après impact sur les trois périodes étudiées, met clairement en évidence des différences significatives, tant sur l'intensité que sur la nature de l'altération hydrologique.

Période 1 : 1947–1976 / 1977–1988 – L'effet du climat en premier plan

Cette première phase est essentiellement marquée par les effets du changement climatique. La réduction globale du débit atteint 41 %, avec des diminutions particulièrement fortes en été (–70 %) et en automne (–65 %). En revanche, les débits hivernaux restent relativement préservés (–20 %), ce qui montre qu'à cette époque, le régime saisonnier conservait encore une certaine résilience. Malgré l'altération, la structure saisonnière reste lisible et cohérente.

Période 2 : 1947–1976 / 1977–2020 – Changement climatique et construction du barrage

Cette deuxième période intègre à la fois les effets prolongés du changement climatique et l'influence croissante de la construction du barrage. La réduction globale des débits est alors bien plus marquée, atteignant 62,5 %. Toutes les saisons sont touchées, avec des diminutions sévères en été (–77 %), en automne (–72 %) et au printemps (–63 %). Ce bouleversement traduit une rupture nette avec les dynamiques naturelles, marquée notamment par la disparition progressive des crues printanières et un affaiblissement du débit de base, modifiant ainsi profondément le régime hydrologique.

Période 3 : Avant / Après 1988 – L'empreinte directe de la mise en eau du barrage

La dernière période met en lumière les conséquences directes de la mise en service du barrage en 1988. La réduction moyenne des débits atteint 57,6 %, avec un impact relativement homogène sur toutes les saisons. L'été (–76 %) et l'automne (–71 %) restent les plus touchés, tandis que le printemps, bien que toujours affecté, subit une altération légèrement moins marquée que lors de la période précédente. La régulation artificielle opérée par le barrage perturbe désormais fortement la répartition saisonnière des débits, effaçant en grande partie les rythmes naturels du cours d'eau.

Tableau IV- 4: Analyse de Réduction globale saisonniers des 3 périodes

Élément	Période 1 (Climat)	Période 2 (Climat + Barrage)	Période 3 (Mise en eau)
Réduction globale (%)	41,0	62,5	57,6
Saisons les plus touchées	Été, Automne	Été, Automne, Printemps	Été, Automne
Saisons les plus stables	Hiver	Aucune	Printemps légèrement
Nature de l'impact	Progressive	Cumulée et structurelle	Brutale et homogène

IV.5 Altération hydrologique d'après l'analyse RVA

L'analyse de l'altération hydrologique du bassin versant d'Oued Lakhdar à l'aide de l'approche RVA a mis en évidence une perturbation progressive et marquée du régime hydrologique au fil des décennies. Trois périodes clés ont été comparées (Tableau IV- 5) :

I.6 Effet du changement climatique (1947–1976 vs 1977–1988)

Durant cette période, on observe une première altération modérée du régime naturel, traduisant principalement l'impact des changements climatiques (réduction des précipitations, hausse des températures, etc.). Les indicateurs hydrologiques montrent déjà un éloignement partiel par rapport aux conditions de référence.

II.6 Effet combiné du changement climatique et du barrage (1947–1976 vs 1977–2020)

L'analyse sur cette période plus longue révèle une aggravation significative de l'altération. L'impact du barrage El Izdihar, couplé aux effets climatiques, a entraîné une modification profonde de la dynamique saisonnière des débits, affectant à la fois les hauts et les bas débits. L'indicateur global d'altération (GIHA) s'en trouve fortement accru, témoignant d'un régime très éloigné de l'état naturel.

III.6 Effet direct du barrage (avant/après 1988)

En comparant les régimes avant et après la mise en eau du barrage, l'impact direct de l'aménagement hydraulique est encore plus net : réduction des crues naturelles, augmentation des périodes d'étiage, et forte régularisation des écoulements. Ce contrôle artificiel accentue la déconnexion avec les besoins écologiques du milieu aquatique.

IV.6 Résumé comparatif

Tableau IV- 6: Évolution mensuelle de l'altération hydrologique d'Oued Lakhdar selon trois scénarios d'impact

Période analysée	Niveau d'altération général	Mois les plus affectés
1947–1976 / 1977–1988 (climat)	Modérée à forte	Été et automne
1947–1976 / 1977–2020 (climat + barrage)	Forte à très forte	Tous les mois sauf janvier–avril
Avant / après 1988 (effet barrage seul)	Très forte	Juillet à décembre

Conclusion

L'étude menée sur le régime hydrologique du bassin versant d'Oued Lakhdar entre 1947 et 2022 met en évidence une altération hydrologique progressive, mais surtout profondément structurante, du fonctionnement naturel du cours d'eau. Cette transformation s'explique par une combinaison d'effets liés au changement climatique et aux interventions humaines, en particulier la construction du barrage et sa mise en eau en 1988, qui joue un rôle central dans cette évolution.

Durant la première période (1947–1976), les écoulements restaient proches des conditions naturelles, avec une variabilité interannuelle autour d'une moyenne stable, traduisant un régime encore peu perturbé. Mais à partir de 1977, une baisse progressive des débits s'amorce, conséquence directe des modifications climatiques (moindre pluviométrie, évaporation accrue), annonçant une première phase d'altération.

L'analyse de l'altération hydrologique, à travers la méthode RVA, étendue jusqu'à 2020, confirme une tendance à la baisse encore plus prononcée, marquée cette fois par une double pression : les effets climatiques persistants et l'intensification des aménagements hydrauliques. La comparaison avant/après 1988 fait ressortir une rupture nette dans le régime des débits. Dès la mise en eau du barrage, les écoulements chutent brutalement et se stabilisent à des niveaux nettement plus faibles, preuve d'une modification profonde et durable des dynamiques hydrologiques naturelles.

L'étude des débits saisonniers permet de mieux cerner cette altération. Avant 1988, les diminutions étaient surtout marquées en été et en automne, traduisant l'impact climatique. Après 1988, l'effet de la régulation par le barrage devient dominant, affectant toutes les saisons de manière plus uniforme et effaçant progressivement le cycle saisonnier naturel.

Le calcul de l'Indicateur Global d'Altération Hydrologique (GIHA), dont la valeur atteint 0,944, indique un niveau d'altération modéré à fort du régime hydrologique, traduisant un éloignement notable par rapport aux conditions naturelles de référence (Richter et al., 1997 ; Brunet & Astagneau, 2007).

En somme, l'altération hydrologique d'après l'analyse des dernières 75 années révèle une trajectoire claire : d'abord liée au climat, puis radicalement amplifiée par l'aménagement hydraulique. Cette situation rappelle l'urgence de mettre en place une gestion intégrée et durable de l'eau, capable d'anticiper les pressions climatiques et d'en limiter les impacts, tout en préservant les fonctions écologiques essentielles du milieu aquatique.

Perspectives

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs pistes de recherche et d'action méritent d'être envisagées pour approfondir la compréhension de l'altération hydrologique et proposer des solutions adaptées :

1. **Modélisation hydrologique prospective** : développer un modèle calibré pour simuler des scénarios futurs intégrant le climat et l'usage des sols afin d'anticiper l'évolution des débits.
2. **Intégration d'indicateurs écologiques** : combiner indicateurs hydrologiques et biologiques pour évaluer l'impact sur les écosystèmes aquatiques et la biodiversité.
3. **Optimisation de la gestion du barrage El Izdihar** : explorer des solutions adaptatives, comme des débits réservés écologiques, pour restaurer une dynamique naturelle des cours d'eau.
4. **Approche participative et gouvernance locale** : impliquer les acteurs locaux et intégrer les savoirs traditionnels pour une gestion durable et concertée.
5. **Suivi à long terme** : instaurer un réseau permanent de surveillance hydrométrique et pluviométrique pour ajuster les politiques en temps réel.

Références bibliographiques

1. Aït Benaouda, A. (2021). *Évaluation de l'érosion hydrique et de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar (Nord-Ouest Algérien)*. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.
2. Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). (2023). *Barrage de Sidi Abdelli*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.anbt.dz/wp-content/uploads/2023/07/Sidi-Abdelli.pdf>
3. ANRH. (2020). *Annuaire Hydrologique National*. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Algérie.
4. Benaouda, A. (2014). *Étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar, Wilaya de Tlemcen*. Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.
5. Bernier, J. (1977). Utilisation de la méthode de la double masse pour le contrôle de l'homogénéité des données hydrologiques. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(3), 513–524.
6. Bouanani, A. (2012). *Impact des barrages sur les écoulements des oueds en Algérie : Cas du bassin versant de l'oued Mina*. Mémoire de Magister en Hydraulique, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.
7. Braga, B., Chartres, C., Cosgrove, W. J., da Cunha, L. V., Gleick, P. H., Kabat, P., ... & Xia, J. (2014). *Water and the future of humanity: Revisiting water security*. Calouste Gulbenkian Foundation and Springer.
8. Brunet, R., & Astagneau, P. (2007). *Méthodologie de définition des objectifs environnementaux pour les masses d'eau fortement modifiées (MEFM) – Application au cas des rivières canalisées*. Ministère de l'Écologie, France, Cemagref – ONEMA.
9. Carbonnel, J. P., & Hubert, P. (1994). Application de la segmentation aux séries hydrométéorologiques africaines. *Journal of Hydrology*, 158(1–2), 107–123.
10. Colwell, R. K. (1974). Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. *Ecology*, 55(5), 1148–1153.
11. Diaf, M., Aït Benaouda, A., & Ghenim, A. N. (2021). Impact of soil erosion on sediment yield in a semi-arid watershed: The case of Oued Lakhdar (NW Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(3), Article 158. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06432-z>
12. Diaf, M., Gherissi, M., et al. (2024). *Étude historique et hydrologique de l'Oued Lakhdar (Chouly)*. *Revue des Sciences de l'Eau et de l'Environnement*, à paraître.
13. Gherissi, M., Diaf, M., et al. (2021). Analyse spatiale du bassin versant de l'Oued Chouly à l'aide des SIG. *Journal Algérien des Ressources en Eau*, 5(2), 55–70.
14. Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, 13, 350–361.
15. Hubert, P. (2000). Analyse de ruptures dans les séries hydrométéorologiques : application à l'Afrique de l'Ouest. *Revue des Sciences de l'Eau*, 13(4), 545–558.
16. Hubert, P., Carbonnel, J. P., & Chaouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110(3–4), 349–367.
17. Lubès-Niel, H., Hughes, J. P., & Lettenmaier, D. P. (1998). Detecting climate change trends in streamflow data. *Water Resources Research*, 34(5), 1167–1174.

18. Maskey M. L., Dourado G. F., Rallings. M., Rheinheimer D. E., Azuara J. M. Joshua, Viers H (2022) : Assessing Hydrological Alteration Caused by Climate Change and Reservoir Operations in the San Joaquin River Basin, California, *Front. Environ. Sci. Sec. Interdisciplinary Climate Studies*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.765426>
19. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
20. Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill.
21. Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121.
22. Ortín León, A. (2017). *Estudio de Alteración Hidrológica en Cuencas con Elevado Estrés Hídrico: El Caso de la Cuenca del río Júcar*. Universitat Politècnica de València.
23. Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
24. Poff, N. L., & Ward, J. V. (1989). Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: A regional analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(10), 1805–1818.
25. Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). *The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration*. *BioScience*, 47(11), 769-784.
26. Rhissa, M. (2018). *Analyse des tendances et détection des ruptures dans les séries chronologiques hydrométéorologiques : Application aux ressources en eau en Afrique de l'Ouest*. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger.
27. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1997). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 11(5), 1163–1174.
28. Santa-María, M. C., & Yuste, F. J. (2010). *IAHRIS 2.2 - Índices de alteración hidrológica en ríos*. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible sur : http://ambiental.cedex.es/sedah/descargas/MANUAL_USUARIO_IAHRIS_v2-2.pdf
29. Sneyers, R. (1990). *On the statistical analysis of series of observations*. Technical Note No. 143, World Meteorological Organization (WMO), Geneva.
30. St-Hilaire, A., Ouarda, T. B., Lachance, M., & Bobée, B. (2009). Statistical analysis of hydrological alterations. *Journal of Hydrology*, 374(3–4), 345–356.
31. Tatar, B., & Regad, F. (2020). Évaluation de l'impact des barrages sur les écosystèmes aquatiques en utilisant des indicateurs hydrologiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 33(1), 55–69.
32. Touahir, S., Asri, A., Remini, B., & Saad, H. (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.
33. Wang, H., Yan, D. H., Jia, Y. W., Hu, D. L., & Wang, L. H. (2010). Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues. *Advances in Water Resources*, 21, 479–489.
34. Wikipedia. (2023). *Commune de Chouly (Tlemcen)*. Wikipédia. Consulté le 19 avril 2025, à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/\[à compléter selon la page exacte\]](https://fr.wikipedia.org/wiki/[à compléter selon la page exacte])

35. Xia, J., Zhang, Y., Xiong, L., He, S., Wang, L., & Yu, Z. (2017). Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China Earth Sciences*, 60(4), 652–658.
36. Yang D, Yang Y, Xia J (2021) : Hydrological cycle and water resources in a changing world : A review, *Geography and Sustainability*, 2 (2) : 115-122.
<https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>.