

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 أبو بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE

Département d'Hydraulique



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Hydraulique

Option : Ressources Hydrauliques

Par : ABDELMADJID Youssouf Djeber

Thème

Impact de la variabilité pluviométrique sur le remplissage du Barrage Sikkak (Tafna – NW Algérien).

Soutenu publiquement le /25/ Septembre 2024, devant le jury composé de :

Mr. GHENIM A.N	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. FANDI W	Maitre. Assistante	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mr. BOUANANI. A	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur
Mme. BABA HAMED. K.	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-directeur

Année Universitaire 2023/2024



Remerciements



Tout d'abord, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la patience, la persévérance et la détermination nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mes chers encadrants, **Monsieur BOUANANI Abderrazak**, Professeur à l'université de Tlemcen et **Madame BABA HAMED Kamila**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour leur soutien inconditionnel, leur aide précieuse, leur accompagnement et leur engagement dans mon projet. Leur passion, leur expertise et leur gentillesse m'ont grandement inspiré et ont joué un rôle essentiel dans la réussite de ce travail.

J'exprime ma gratitude au professeur **GHENIM Abderramane Nekfache** pour avoir accepté de présider le jury.

Je remercie également Mademoiselle **FANDI Wassila**, Maitre Assistante à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner mon travail. Ses commentaires constructifs, ses remarques et ses suggestions ont grandement contribué à améliorer la qualité de mon mémoire.

J'adresse mes vifs remerciements à l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Alger et celle de Tlemcen de m'avoir permis d'accéder aux données utilisées dans ce travail.

J'exprime également ma profonde gratitude à tout le personnel du barrage Sikfak pour leur chaleureux accueil durant mon passage.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes familles et amis respectifs pour leur soutien et leur proximité à tous les instants.

Enfin, à l'issue de mon parcours académique, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de mon projet de fin d'études.

ABDELMADJID





Dédicace



Je dédie ce travail cet humble et modeste travail avec un grand amour, sincérité et fierté :

A ma chère mère HALIME Neissa pour son amour et éducation qu'elle m'a donnée. Chère maman, que Dieu vous accorde une santé de fer. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ta présence. Je t'aime de tout mon cœur.

A mon cher père YOUSSEUF Djeber pour ses conseils précieux, son affection et la confiance qu'il m'a accordé durant mes longues années d'études. Je vous souhaite que du bonheur.

A mon cher oncle OUSMANE Neissa pour son soutien, son aide, ses sacrifices et ses engagements tout au long de mes études. Que Dieu te bénisse.

A tous les membres de ma famille.

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis ainsi qu'à tous mes professeurs.

Et enfin à tous ceux qui m'aiment.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'impact de la variabilité des précipitations sur le remplissage du barrage de Sikkak, situé dans le bassin de la Tafna au nord-ouest de l'Algérie. Il commence par une description détaillée du bassin versant de l'Oued Sikkak, en mettant en avant ses caractéristiques géographiques et hydrologiques. Le bassin présente une forme allongée avec une forte densité de drainage, un relief marqué, et un risque d'érosion significatif.

L'étude analyse ensuite les données climatiques et hydrologiques sur une période de 41 ans (1982-2023), révélant une variabilité importante des précipitations avec une moyenne annuelle de 416 mm. L'hiver est la saison la plus pluvieuse, tandis que l'été reste la plus sèche, caractérisant un climat semi-aride.

Le mémoire utilise diverses méthodes statistiques, comme la loi normale et la loi de Galton, pour modéliser les précipitations et prévoir les événements hydrologiques rares (périodes de 10, 100 et 1000 ans). Ces prévisions sont nécessaires pour évaluer la variabilité climatique future et son impact sur les ressources en eau du bassin.

Deux modèles hydrologiques, GR1A et GR2M, ont été utilisés pour simuler la relation entre les précipitations et les débits. Les résultats montrent que le modèle GR1A est performant, offrant une bonne corrélation entre les précipitations et les débits, ce qui permet de prédire avec précision les débits annuels. Cependant, le modèle GR2M, bien que modérément performant, présente des écarts pour les débits élevés. Les résultats mettent en évidence la nécessité d'améliorer ce modèle pour une meilleure prévision, en particulier pendant les périodes de crue.

Ce travail conclut que la modélisation hydrologique, combinée à une analyse statistique approfondie, permet d'évaluer de manière efficace l'impact des précipitations sur les apports en eau du bassin versant et de mieux anticiper les variations climatiques futures.

Mots clés : Impact, Variabilité climatique, Bassin versant, Barrage de Sikkak.

Abstract

This thesis focuses on the impact of precipitation variability on the filling of the Sikkak dam, located in the Tafna basin in northwestern Algeria. It begins with a detailed description of the Oued Sikkak watershed, highlighting its geographical and hydrological characteristics. The basin has an elongated shape with a high drainage density, significant relief, and a notable risk of erosion. The study then analyzes climatic and hydrological data over a 41-year period (1982-2023), revealing significant precipitation variability, with an annual average of 416 mm. Winter is the wettest season, while summer remains the driest, characterizing a semi-arid climate.

The thesis employs various statistical methods, such as the normal distribution and Galton's law, to model precipitation and forecast rare hydrological events (10, 100, and 1,000-year periods). These forecasts are crucial for assessing future climate variability and its impact on the water resources of the basin.

Two hydrological models, GR1A and GR2M, were used to simulate the relationship between precipitation and runoff. The results show that the GR1A model performs well, offering a strong correlation between precipitation and discharge, allowing for accurate annual discharge predictions. However, the GR2M model, although moderately effective, shows discrepancies for high flow rates. The results highlight the need to improve this model for better forecasting, particularly during flood periods.

This study concludes that hydrological modeling, combined with thorough statistical analysis, provides an effective means of assessing the impact of precipitation on the water inflows of the watershed and better anticipating future climatic variations.

Key words : Impact, Climate variability, Watershed, Sikkak dam.

المخلص

هذه الدراسة تركز على تأثير تذبذب التساقطات على تعبئة سد سِكاك، الذي يقع في حوض تافنة في شمال غرب الجزائر. تبدأ بوصف مفصل لحوض واد سِكاك، مع إبراز الخصائص الجغرافية والهيدرولوجية الخاصة به. الحوض له شكل مستطيل مع كثافة تصريف عالية، تضاريس بارزة، وخطر كبير للتعرية.

الدراسة تحلل بعد ذلك البيانات المناخية والهيدرولوجية على مدى 41 سنة (1982-2023)، حيث كشفت عن تذبذب كبير في التساقطات، بمتوسط سنوي قدره 416 ملم. الشتاء هو الفصل الأكثر مطراً، بينما الصيف هو الأكثر جفافاً، مما يميز مناخاً شبه جاف.

تستخدم الدراسة عدة طرق إحصائية، مثل التوزيع الطبيعي وقانون جالتون، لنمذجة التساقطات والتنبؤ بالأحداث الهيدرولوجية النادرة (لفترات 10، 100، و1000 سنة). هذه التوقعات مهمة لتقييم التغيرات المناخية المستقبلية وتأثيرها على الموارد المائية في الحوض.

، لمحاكاة العلاقة بين التساقطات والجريان السطحي. أظهرت النتائج GR1A و GR2M تم استخدام نموذجين هيدرولوجيين، فعال، حيث يقدم علاقة قوية بين التساقطات والتدفقات، مما يسمح بتنبؤ دقيق بالتدفقات السنوية. أما النموذج GR1A أن نموذج ، رغم أنه متوسط الأداء، فقد أظهر تفاوتات في التدفقات العالية. النتائج توضح الحاجة إلى تحسين هذا النموذج لتحقيق GR2M توقعات أفضل، خصوصاً خلال فترات الفيضانات.

خلصت هذه الدراسة إلى أن النمذجة الهيدرولوجية، مرفوقة بتحليل إحصائي معمق، توفر وسيلة فعالة لتقييم تأثير التساقطات على تدفقات المياه في الحوض، والتنبؤ بشكل أفضل بالتغيرات المناخية المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: التأثير، التغيرات المناخية، حوض المياه، سد سِكاك.

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1: LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	6
FIGURE I-2: RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK (ARCGIS)	9
FIGURE I-3: CARTE DE LA DENSITE DE DRAINAGE.....	10
FIGURE I-4: COURBE HYPOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SIKKAK.....	12
FIGURE I-5: HISTOGRAMME DES FREQUENCES ALTIMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SIKKAK.....	13
FIGURE I-6: CARTE HYPOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.....	14
FIGURE I-7: CARTE DE PENTE DU BASSIN VERSANT.....	15
FIGURE I-8: PROFIL EN LONG D'OUED SIKKAK. (BERREZOUG ET KISSI, 2002)	18
FIGURE I-9: CARTE D'OCCUPATION DE SOL DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK	19
FIGURE I-10: CARTE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SIKKAK. (BOUANANI, A, 2004)	21
FIGURE II-1: LOCALISATION DES DIFFERENTES STATIONS PLUVIOMETRIQUES	25
FIGURE II-2: VARIATION ANNUELLE DES PRECIPITATIONS AUX DIFFERENTES STATIONS PLUVIOMETRIQUES.	29
FIGURE II-3: PRECIPITATIONS MOYENNES INTERANNUELLES, MINIMALES ET MAXIMALES DES STATIONS.	30
FIGURE II-4: VARIATION MOYENNE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS AUX DIFFERENTES STATIONS	32
FIGURE II-5: HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES DES STATIONS	34
FIGURE II-6: DISTRIBUTION DES PRECIPITATIONS MOYENNES INTER-SAISONNIERES DES QUATRE STATIONS	34
FIGURE II-7: AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS A LA LOI DE GAUSS POUR LES DIFFERENTES STATIONS.	36
FIGURE II-8: VARIATION DES TEMPERATURES ANNUELLES DES STATIONS (1982/1983-2022/2023).	39
FIGURE II-9: VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES DES DIFFERENTES STATIONS ETUDIEES (1982/1983-2022/2023).....	40
FIGURE II-10: VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES SAISONNIERES	42
FIGURE II-11: COURBE PLUVIO-THERMIQUE MOYENNE DU BASSIN DU SIKKAK (1982/1983-2022/2023)	43
FIGURE II-12: ABAQUE DE DE MARTONNE	44
FIGURE II-13: VARIATION MOYENNE ANNUELLE DE L'ETP TURC ET L'ETP THORNTHWAITE POUR LES DIFFERENTES STATIONS DE NOTRE BASSIN VERSANT.	47
FIGURE II-14: VARIATION DES APPORTS ANNUELS DE L'OUED SIKKAK.....	49
FIGURE II-15: L'EVOLUTION DU COEFFICIENT D'ECOULEMENT ANNUEL (1982/1983-2022/2023).	51
FIGURE II-16: DROITE D'AJUSTEMENT DES APPORTS ANNUELS A LA LOI LOG NORMALE.....	53
FIGURE II-17: HISTOGRAMME DES APPORTS MENSUELS A LA STATION DE SIKKAK.....	54
FIGURE II-18: HISTOGRAMME DES APPORTS MOYENS SAISONNIERS A LA STATION DU BARRAGE DE SIKKAK	55
FIGURE III-1: VARIATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES DES 4 STATIONS ETUDIEES ET DES APPORTS EN EAU A LA STATION DU BARRAGE DE SIKKAK.	59
FIGURE III-2: RESULTATS DE CORRELATIONS ENTRE LES PLUIES ANNUELLES AUX DIFFERENTES STATIONS ET LE DEBIT ANNUEL A LA STATION SIKKAK.	60
FIGURE III-3: RESULTATS DE CORRELATION DES PMOY AN ET LES DEBITS ANNUELS DE SIKKAK.	61
FIGURE III-4: RESULTATS DE CORRELATIONS ENTRE LA P MENSUELLE AUX DIFFERENTES STATIONS ET LE DEBIT A LA STATION DU BARRAGE SIKKAK (1982/1983-2022/2023).....	62
FIGURE III-5: VISUALISATION DE LA QUALITE DU CALAGE	64
FIGURE III-6: CORRELATION ENTRE LE DEBIT SIMULE ET LE DEBIT OBSERVE	65
FIGURE III-7: VISUALISATION DE LA VALIDATION	67
FIGURE III-8: CORRELATION ENTRE LE DEBIT SIMULE ET LE DEBIT OBSERVE	67
FIGURE III-9: VISUALISATION DE LA QUALITE DU CALAGE.	71
FIGURE III-10: CORRELATION ENTRE LE DEBIT SIMULE ET LE DEBIT OBSERVE DE GR2M.....	71
FIGURE III-11: VISUALISATION DE LA QUALITE DE VALIDATION DE GR2M.....	73
FIGURE III-12: CORRELATION ENTRE LE DEBIT SIMULE ET OBSERVE DE GR2M.	73

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1: CARACTERISTIQUES DE FORME DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.....	7
TABLEAU I-2: RAPPORT DE CONFLUENCE	10
TABLEAU I-3: REPARTITION HYPOMETRIQUE DU BASSIN D'OUED SIKKAK	12
TABLEAU I-4 : LES ALTITUDES CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.	14
TABLEAU I-5: CLASSIFICATION DU RELIEF SELON IG PAR L'ORSTOM	16
TABLEAU I-6: CLASSIFICATION DU RELIEF SELON Ds PAR L'ORSTOM	16
TABLEAU I-7: INDICE DE PENTE ET RELIEF DU BASSIN VERSANT DE SIKKAK	16
TABLEAU I-8: VALEURS DU COEFFICIENT DE TORRENTIALITE ET DU TEMPS DE CONCENTRATION DES EAUX DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.....	17
TABLEAU I-9: CALCUL DES PENTES DE CHAQUE TRONÇON. (BERREZOUG ET KISSI, 2002)	18
TABLEAU I-10: DISTRIBUTION DU COUVERT VEGETAL DANS LE BASSIN D'OUED SIKKAK	19
TABLEAU I-11: RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX PARAMETRES DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.....	23
TABLEAU II-1: CARACTERISTIQUES DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES	25
TABLEAU II-2: PLUVIOMETRIE ANNUELLE (MM) AUX DIFFERENTES STATIONS PLUVIOMETRIQUES (1982/1983- 2022/2023).	26
TABLEAU II-3: LES CARACTERISTIQUES DES PRECIPITATIONS (MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES) DES STATIONS	30
TABLEAU II-4: PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES AUX DIFFERENTES STATIONS (1982/1983-2022/2023).....	30
TABLEAU II-5: PLUVIOMETRIE MOYENNE SAISONNIERE AUX DIFFERENTES STATIONS (1982/1983-2022/2023).	32
TABLEAU II-6: PARAMETRES DE POSITION DES PRECIPITATIONS	35
TABLEAU II-7: PARAMETRES STATISTIQUES DES SERIES PLUVIOMETRIQUES AUX DIFFERENTES STATIONS	35
TABLEAU II-8: AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DES STATIONS.	36
TABLEAU II-9: CALCUL DES PRECIPITATIONS POUR LES PERIODES DE RECURRENCE DES ANNEES HUMIDES.	37
TABLEAU II-10: VALEURS DES PRECIPITATIONS POUR LES PERIODES DE RECURRENCE DES ANNEES SECHES	37
TABLEAU II-11: TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES DES DIFFERENTES STATIONS (1982/1983-2022/2023).....	37
TABLEAU II-12: LES VALEURS MOYENNES MENSUELLES DES TEMPERATURES AUX STATIONS ETUDIEES (1982/1983- 2022/2023)	39
TABLEAU II-13: VARIATIONS DES TEMPERATURES MOYENNES SAISONNIERES AUX STATIONS	41
TABLEAU II-14: PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (1982/1983-2022/2023).....	42
TABLEAU II-15: CLASSIFICATION DU CLIMAT SUIVANT L'INDICE D'ARIDITE DE DE MARTONNE	44
TABLEAU II-16: CLASSIFICATION DU CLIMAT MENSUEL SELON DE MARTONNE AUX DIFFERENTES STATIONS ETUDIEES (1982/1983-2022-2023).....	44
TABLEAU II-17: VALEURS MOYENNES ANNUELLES DE L'ETP PAR LA METHODE DE TURC AUX DIFFERENTES STATIONS (1982/1983-2022/2023).....	45
TABLEAU II-18: VALEURS MOYENNES ANNUELLES DE L'ETP PAR LA METHODE DE THORNTHWAITE AUX DIFFERENTES STATIONS (1982/1983-2022/2023).....	46
TABLEAU II-19: APPORTS ANNUELS DE SIKKAK (1982/1983-2022/2023)	48
TABLEAU II-20: COEFFICIENTS D'ECOULEMENT ANNUEL	50
TABLEAU II-21: LES CARACTERISTIQUES DE LA SERIE HYDROMETRIQUE TRANSFORMEE EN LOGARITHME DE SIKKAK (1982/1983-2022/2023).....	52
TABLEAU II-22: FREQUENCES POUR L'AJUSTEMENT DE LA DROITE DE GALTON	53
TABLEAU II-23: CALCULS DES APPORTS POUR LES PERIODES DE RETOUR : DECANALE, CENTENNALE ET MILLENAIRE	53
TABLEAU II-24: APPORTS MENSUELS (Hm3) DE SIKKAK (1982/83-2022/023)	54
TABLEAU II-25: APPORTS SAISONNIERS A LA STATION DU BARRAGE DE SIKKAK (1982/1983-2022/2023).....	55
TABLEAU III-1: PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES POUR LES DIFFERENTES STATIONS ET LES APPORTS ANNUELS AU BARRAGE SIKKAK (1982/1983-2022/2023).	57
TABLEAU III-2: RESULTATS DU CALAGE DE GR1A	64
TABLEAU III-3: RESULTATS DE VALIDATION DE GR1A	66
TABLEAU III-4: RESULTATS DU CALAGE DE GR2M.....	70
TABLEAU III-5: RESULTATS DE VALIDATION DE GR2M	72
TABLEAU III-6: RESULTATS TROUVES A PARTIR DE SIMULATION A L'AIDE DE MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE (GR).....	74
TABLEAU III-7: RESULTATS DES APPORTS OBTENUS PAR SIMULATION.	74
TABLEAU III-8: RESULTATS DES APPORTS OBTENUS PAR L'ETUDE STATISTIQUE.....	75

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I Présentation de la zone d'étude 4

I.1 Introduction..... 4

I.1.1 Évolution et gestion du barrage de Sikkak face à la variabilité climatique 4

I.2 Situation géographique du bassin versant de l'Oued Sikkak 6

I.3 Morphométrie du bassin versant d'oued Sikkak 6

I.3.1 Caractéristiques de forme 7

I.3.1.1 Indice de compacité Gravelius 7

I.3.1.2 Rectangle Equivalent 7

I.3.1.3 Le coefficient de circularité du bassin 8

I.4 Etude du réseau hydrographique..... 8

I.4.1 Densité de drainage 9

I.4.2 Rapport de confluence 10

I.4.3 La fréquence des cours d'eau 11

I.5 Etude du relief..... 11

I.5.1 Hypsométrie 12

I.5.2 Altitudes caractéristiques 13

I.6 Les indices de pente et relief 14

I.6.1 Etude des pentes 14

I.6.1.1 Indice de pente de Roche I_p 15

I.6.1.2 Indice de pente globale I_g 15

I.6.1.3 Dénivelée spécifique D_s 16

I.6.2 Coefficient de torrencialité 17

I.6.3 Temps de concentration 17

I.6.4 Étude du profil en long 17

I.7 Sol et végétation 19

I.8 Etude géologique..... 20

I.8.1 Introduction..... 20

I.8.2 Les formations secondaires 21

I.8.2.1 Les grés de Boumediene 21

I.8.2.2 Les calcaires de Zarifet 21

I.8.2.3	Les dolomies de Tlemcen	21
I.8.3	Les formations tertiaires	22
I.8.3.1	Eocène	22
I.8.3.2	Le Miocène marin.....	22
I.8.3.3	Le Pliocène	22
I.8.4	Les formations quaternaires	22
I.8.4.1	Les alluvions anciennes	22
I.8.4.2	Les alluvions récentes.....	22
Chapitre II	Hydro-climatologie	24
	Introduction	24
II.1	Aperçu sur le climat de l'Algérie.....	24
II.2	Etude de la pluviométrie	24
II.2.1	Répartitions des stations pluviométriques de la zone d'étude	25
II.2.2	Variation annuelle de la pluviométrie.....	26
II.2.3	La variation moyenne mensuelle de la pluviométrie	30
II.2.4	La variation moyenne saisonnière de la pluviométrie	32
II.2.5	Etude statistique des précipitations annuelles.....	34
II.2.5.1	Ajustement par la loi normale	35
II.3	Etude des températures.....	37
II.3.1	Introduction.....	37
II.3.2	La température moyenne annuelle	37
II.3.3	La température moyenne mensuelle	39
II.3.4	Température moyenne saisonnière	41
II.4	Etude du climat	42
II.4.1	Indice climatique : Indice d'aridité de De Martonne (1926)	43
II.4.1.1	Indice d'aridité annuel de De Martonne.....	43
II.4.1.2	Indice d'aridité mensuel de De Martonne	44
II.5	Etude d'évapotranspiration.....	45
II.5.1	Introduction.....	45
II.5.2	Evapotranspiration selon la méthode de TURC.....	45
II.5.3	Evapotranspiration selon la méthode de Thornthwaite.....	46
II.6	Etude hydrologique	47
II.6.1	Apports annuels du bassin versant de l'oued Sikkak.....	47
II.6.2	La variabilité du coefficient d'écoulement	49
II.6.3	Etude statistique des apports annuels de l'Oued Sikkak.....	51
II.6.3.1	Ajustement par la loi log normale	52
II.6.4	Apports moyens mensuels de l'Oued Sikkak	54
II.6.4.1	Apports moyens saisonniers de Sikkak	55
II.7	Conclusion	55
Chapitre III	- Etude de la relation entre les précipitations et les apports au bassin versant de l'Oued Sikkak.....	57
	Introduction	57

III.1 Variations annuelles de la pluie et de l'apport de Sikkak	57
III.2 La modélisation pluie-débit par la corrélation simple	59
III.2.1 Corrélation pluie-apport au pas de temps annuel.....	60
III.2.2 Corrélation pluie-débit au pas de temps mensuel	61
III.3 La modélisation pluie-débit par le modèle GR	62
III.3.1 Modèle pluie-débit annuel GR1A.....	62
III.3.1.1 Le calage du modèle GR1A.....	63
III.3.1.2 Validation du modèle GR1A	65
III.3.2 Modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	67
III.3.2.1 Caractéristiques et structure du modèle GR2M.....	68
III.3.2.2 Fonctionnement du modèle	68
III.3.2.3 Étapes de calage et validation.....	68
III.3.2.4 Avantages du modèle GR2M	69
III.3.2.5 Limites et perspectives	69
III.3.3 Application sur le bassin d'oued Sikkak et Résultats	69
III.3.3.1 Calage du modèle GR2M	69
III.3.3.2 Validation du modèle GR2M	71
III.3.3.3 Les résultats de simulation des débits à partir de GR.....	74
III.3.4 Comparaison des résultats des apports trouvés par l'étude statistique et par simulation de GR.	74
III.3.5 Conclusion	75
Conclusion générale et Recommandations	77

LISTE DES ABREVIATIONS

- A : Aire du bassin (Km²)
- BV : Bassin versant
- P an : Précipitations annuelles (mm)
- AP : Apport (Hm³)
- Q : Débits (mm)
- Kc : Indice de compacté de Gravelius
- P : Périmètre (Km)
- L : Longueur (Km)
- l : Largeur (Km)
- Dd : Densité de drainage (Km/Km²)
- Rci : Coefficient de circularité
- Rc : Rapport de confluence
- Nn : Nombre de cours d'eau d'ordre n
- Ip : indice de pente de la roche (%)
- Ig : Indice de pente globale de la roche (m/Km)
- D : Dénivelé (m)
- Ds : Dénivelé spécifique (m)
- Ct : Coefficient de torrentialité
- Fs : Fréquence de cours d'eau
- F1 : Fréquence de thalweg élémentaire
- Tc : Temps de concentration (Heures)
- Hmax : Altitude maximale du bassin versant (m)
- Hmin : Altitude minimale du bassin versant (m)
- Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant (m)
- T : Température (°C)
- Tmax : Température maximale (°C)
- Tmin : Température minimale (°C)
- Tmoy : Température moyenne (°C)

u : Variable réduite de Gauss

σ : Ecart type

\bar{P} : Moyenne

ETP : évapotranspiration potentielle

I : Indice d'aridité annuel de De Martonne

I_m : Indice d'aridité mensuel de De Martonne

GR1A : Génie rural annuel à un paramètre

GR2M : Génie rural mensuel à deux paramètres

Qobs : Débit observé (mm)

Qsim : Débit simulé (mm)

Ce : coefficient d'écoulement (%)

Introduction générale

L'eau est une ressource vitale pour le développement socio-économique et environnemental de notre planète. Son accès et sa gestion constituent des enjeux majeurs, particulièrement dans les régions où les conditions climatiques et géographiques limitent sa disponibilité. L'Algérie, pays semi-aride avec 87% de son territoire classé comme désertique, fait face à ces défis de manière significative. Les ressources hydriques y sont limitées, irrégulières et fragiles, malgré leur diversité.

Le climat semi-aride à aride de l'Algérie se traduit par des précipitations peu abondantes, variant entre 200 et 400 mm annuellement. Cependant, l'efficacité de ces précipitations est également limitée par le fait que seule une partie relativement faible des eaux de pluie est mobilisable pour les usages humains et industriels, en raison de contraintes techniques et géographiques.

Face à cette réalité, les barrages ont émergé comme des infrastructures incontournables dans la gestion des ressources en eau en Algérie. Initialement avec une dizaine de barrage construits pendant l'époque coloniale, ils sont aujourd'hui au nombre de plus de 110, gérés par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), totalisant une capacité de stockage de 4,5 milliards de mètres cubes. Ces barrages jouent un rôle vital dans la régulation des débits, la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et la prévention des crues.

Cependant, la gestion de ces barrages est confrontée à plusieurs contraintes notamment l'envasement et la diminution du niveau d'eau, résultant en partie de la variabilité climatique observée au cours des dernières décennies. Cette variabilité se traduit par des fluctuations importantes dans les précipitations, impactant directement le remplissage des barrages, notamment celui de Sikkak.

Le barrage de Sikkak, situé dans le bassin de l'oued du même nom, constitue l'un des cinq barrages de la Tafna au nord-ouest de l'Algérie. En tant que sous-bassin de la Tafna, l'oued Sikkak est tributaire de précipitations irrégulières qui caractérisent le climat régional. Ces variations saisonnières et interannuelles des précipitations influencent directement le régime hydrologique de l'oued, et par conséquent, le remplissage du barrage qui lui est associé.

Dans ce contexte, cette étude vise à examiner en profondeur l'impact de la variabilité climatique sur le remplissage du barrage de Sikkak. En analysant les données historiques des précipitations et des températures, ainsi que les modèles hydrologiques, nous chercherons à comprendre les tendances passées et à anticiper les évolutions futures du niveau d'eau dans le réservoir. Cette analyse tiendra compte également des scénarios climatiques projetés, afin d'évaluer les risques et les opportunités associés à la gestion des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.

Les résultats de cette étude seront nécessaires pour orienter les politiques de gestion des ressources en eau dans le bassin de la Tafna. En comprenant mieux les interactions entre la variabilité climatique et le remplissage du barrage de Sikkak, nous pourrons élaborer des stratégies plus efficaces et durables pour assurer une utilisation équilibrée et résiliente des ressources hydriques dans cette région stratégique de l'Algérie.

Problématique

La problématique de cette étude réside dans la question suivante : Comment la variabilité climatique impacte-t-elle le remplissage du barrage de Sikkak et quelles sont ses implications pour la gestion durable des ressources en eau dans le bassin du Sikkak ?

Pour répondre à cette question, il convient d'analyser les tendances passées et futures de la variabilité climatique dans la région, en examinant les données historiques des précipitations et des températures. Ensuite, il est nécessaire d'évaluer l'incidence de ces variations climatiques sur le régime hydrologique de l'oued Sikkak et, par extension, sur le niveau de remplissage du barrage. Enfin, il s'agit d'identifier les conséquences de ces changements pour la gestion des ressources en eau dans le bassin de la Tafna, en termes de sécurité hydrique, d'adaptation aux risques de sécheresse et de prévention des crues.

Cette problématique soulève ainsi des enjeux fondamentaux liés à la gestion intégrée des ressources en eau, à l'adaptation aux changements climatiques et à la promotion de pratiques durables dans un contexte de pression croissante sur les écosystèmes aquatiques et les populations dépendantes de ces ressources.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- ❖ Identifier les tendances passées et futures du remplissage du barrage : À partir de l'analyse des données climatiques et hydrologiques, l'objectif est de déterminer les évolutions du niveau d'eau dans le barrage au fil du temps, ainsi que les projections pour les années à venir en tenant compte des scénarios climatiques.
- ❖ Comprendre les implications de la variabilité climatique pour la gestion des ressources en eau : Cette étude vise à évaluer les conséquences de la fluctuation du niveau d'eau dans le barrage de Sikkak sur la disponibilité en eau pour les différents usages, tels que l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et la prévention des crues.
- ❖ Proposer des recommandations pour une gestion adaptative et durable du barrage : En se basant sur les résultats de l'analyse, l'objectif est de formuler des recommandations pratiques et stratégiques pour optimiser l'utilisation des ressources en eau dans le bassin de la Tafna, en tenant compte des défis posés par la variabilité climatique.

En résumé, les objectifs de cette étude visent à approfondir la compréhension de l'interaction entre la variabilité climatique et le remplissage du barrage de Sikkak, ainsi qu'à proposer des solutions innovantes pour une gestion durable et résiliente des ressources en eau dans la région.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres à savoir :

Le premier chapitre porte sur la présentation générale de la zone d'étude (situation géographique, étude des caractéristiques physiques, morpho-métriques et géologiques du bassin versant de l'Oued Sikkak).

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à l'étude climatique hydrologique du bassin versant en utilisant les données des précipitations, des débits ou apports et celles des températures pour pouvoir déterminer le climat de la zone en question, connaître l'écoulement

du bassin versant et utiliser la loi d'ajustement comme la loi normale afin d'ajuster la distribution des précipitations et les débits.

Le troisième chapitre s'accroche sur l'étude de la relation entre pluie-apport du bassin de l'Oued Sikkak pour connaître la variabilité et l'influence des précipitations sur l'apport.

Et enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale et quelques recommandations.

Chapitre I Présentation de la zone d'étude

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons les caractéristiques morpho-métriques, géologiques, d'occupation du sol et climatiques du bassin de l'Oued Sikkak, éléments essentiels pour comprendre l'impact de la variabilité climatique sur le remplissage du barrage Sikkak.

Le bassin de l'Oued Sikkak offre un paysage d'une grande diversité, allant des reliefs montagneux aux plaines fertiles, créant ainsi un écosystème varié et complexe. Ces caractéristiques morpho-métriques influent directement sur la dynamique hydrologique de la région, impactant le flux et la rétention des eaux dans le barrage.

Par ailleurs, l'étude de la géologie du bassin permet de comprendre la nature des sols et des substrats, ainsi que les processus géodynamiques en jeu. Ces données sont essentielles pour évaluer la capacité du sol à retenir l'eau et à réguler les écoulements, éléments déterminants dans le contexte de gestion hydraulique du barrage.

L'occupation du sol, quant à elle, révèle les différentes activités humaines présentes dans la région, telles que l'agriculture, l'urbanisation et la foresterie, qui peuvent influencer la qualité et la quantité des eaux s'écoulant vers le barrage.

Enfin, l'étude des données climatiques, incluant les précipitations, les températures et les phénomènes météorologiques extrêmes, est fondamentale pour appréhender la variabilité climatique à l'œuvre dans le bassin. Ces facteurs jouent un rôle majeur dans la régulation du débit des cours d'eau alimentant le barrage.

I.1.1 Évolution et gestion du barrage de Sikkak face à la variabilité climatique

Le barrage est situé sur l'oued Sikkak au niveau de Guaadet Boukaben, à environ 1 km du village d'Aïn-Youcef et à 20 km au nord de Tlemcen. Le site du barrage est accessible via les routes de wilaya W-38 et W-71.

Le barrage de Sikkak a été initialement construit pour répondre aux besoins en eau destinés à l'irrigation de la plaine d'Hennaya et de la vallée de l'oued Sikkak. Sa fonction première était de soutenir le développement agricole en assurant un approvisionnement régulier en eau pour les cultures dans cette zone semi-aride, où l'irrigation est indispensable pour la production.

Néanmoins, avec l'augmentation rapide de la population dans la région de Tlemcen, les priorités en matière de gestion de l'eau ont évolué. En raison de la pression démographique croissante, la destination du barrage a été réorientée vers l'alimentation en eau potable pour la ville de Tlemcen, dont les besoins en eau ne cessaient d'augmenter. Ce changement de destination a nécessité une adaptation des ressources en eau pour répondre aux exigences de consommation humaine, tout en maintenant un équilibre avec les besoins agricoles initiaux.

Le barrage de Sikkak a une capacité de stockage totale de 30 Mm³, et il est capable de régulariser un volume annuel de 25 Mm³, permettant ainsi d'assurer un approvisionnement en eau, malgré les fluctuations saisonnières des précipitations.

Présentation de la zone d'étude

Cependant, au cours des dernières décennies, le barrage fait face à la variabilité climatique, aggravée par des précipitations irrégulières. La région a connu des périodes de sécheresse prolongée ainsi que des événements pluviométriques extrêmes, ce qui a affecté le niveau de remplissage du barrage de manière significative. Des années de faible précipitation ont réduit les apports en eau, mettant à mal sa capacité à répondre aux besoins de la population et des agriculteurs. Inversement, des événements pluviométriques excessifs, bien que bénéfiques en termes de volume d'eau, ont parfois entraîné des défis de gestion et de stockage. Depuis sa mise en service en 2004/2005, le barrage a atteint son niveau maximal en avril 2009 grâce aux précipitations abondantes qui ont alimenté l'ensemble des cours d'eau du bassin versant, augmentant ainsi le flux d'écoulement vers le barrage. Par la suite, le niveau d'eau est resté relativement stable au fil des années, à l'exception de l'année 2020/2021, où une exploitation excessive a eu lieu. Cette situation a entraîné un transfert d'eau vers **Sidi Bel Abbès** via l'oued, selon les informations fournies par la direction du barrage de Sikkak.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'analyser l'impact de la pluviométrie sur les apports en eau du bassin versant (BV) de l'oued Sikkak. Cette étude consiste à examiner les données historiques des précipitations et des débits, ainsi que les données plus récentes, afin d'évaluer la manière dont la variabilité climatique a influencé le comportement hydrologique du bassin.



Photo prise le 27/03/2024.



Photo prise en 2009.

I.2 Situation géographique du bassin versant de l'Oued Sikkak

Le bassin versant de l'oued Sikkak est un sous bassin de la Tafna. Il est situé au nord-ouest de l'Algérie, entre 1°23'5" et 1°12'6" de longitude ouest, et entre 34°5'2" et 34°49'53" de latitude Nord, il prend naissance sur le plateau de Terny à la source d'Aïn Rhanous. Déterminé par Arcgis, le bassin versant occupe une superficie d'environ 221.68 Km² dans un périmètre de 83,35 Km.

Il est limité :

- Au sud par les Djebels Nador et Bouladour.
- A l'est par les Djebels Er Ramlya, Ouakrif et Tabelaout.
- A l'ouest, par le Djebel Tiffatisset et le plateau de Zenata.
- Au nord par le Djebel Fout Hait.

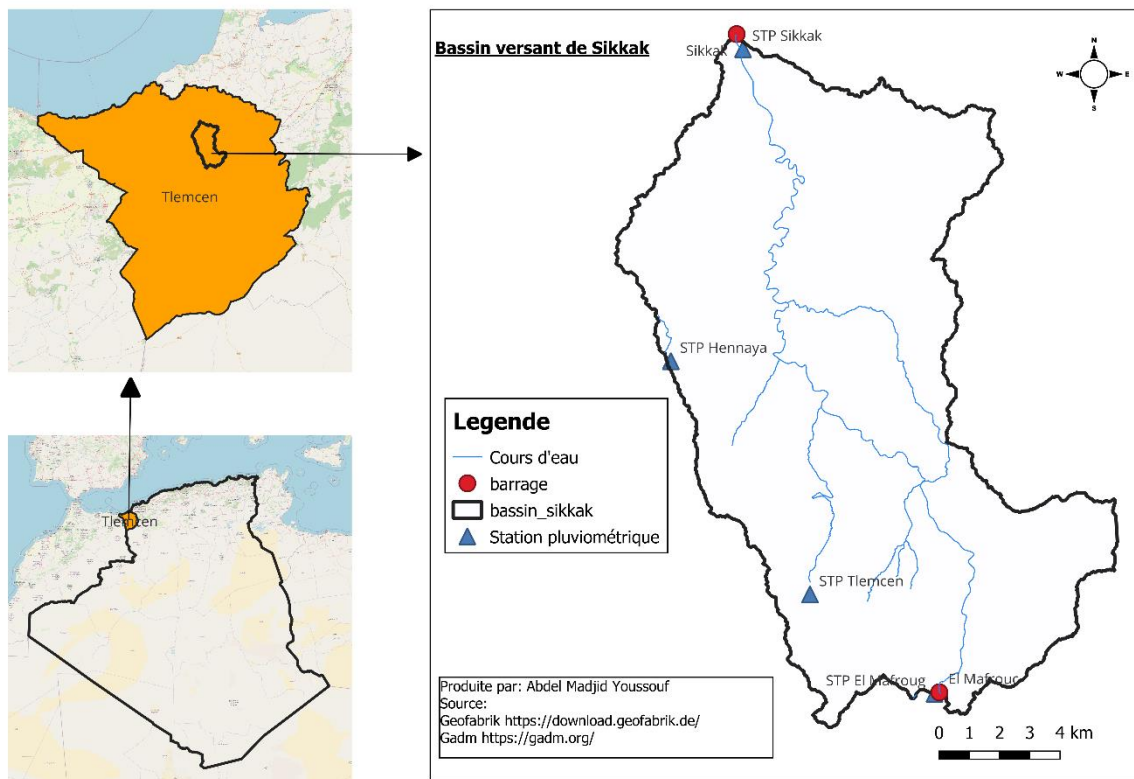


Figure I-1: localisation de la zone d'étude

I.3 Morphométrie du bassin versant d'oued Sikkak

L'écoulement naturel des eaux dans un bassin versant est influencé à la fois par les conditions climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin. Parmi ces caractéristiques, la forme, le relief et le réseau hydrographique jouent un rôle important et sont examinés dans le cadre de l'analyse morpho-métrique. En complément de cette analyse, d'autres caractéristiques telles que la densité de drainage, la fréquence des cours d'eau, ainsi que l'allongement et le profil du cours d'eau sont également prises en compte.

I.3.1 Caractéristiques de forme

La forme d'un bassin versant joue un rôle fondamental dans la dynamique hydrologique, influençant directement l'allure de l'hydro-gramme de crue à l'exutoire. En particulier, la forme géométrique du bassin affecte la concentration des eaux de ruissellement et, par conséquent, le débit des crues.

Ainsi, la forme du bassin versant constitue un paramètre clé dans l'analyse hydrologique et dans la prévision des événements de crue. Des études morpho-métriques permettent d'évaluer cette forme, notamment à travers des indicateurs tels que le coefficient de compacité (Kc) ou encore le rapport de forme, qui quantifie l'allongement ou la circularité du bassin. Une meilleure compréhension de ces caractéristiques permet une gestion plus efficace des ressources en eau et des risques associés aux inondations.

I.3.1.1 Indice de compacité Gravelius

C'est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin. Il est donné par la relation suivante :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Eq.1 1}$$

Avec Kc : indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre du bassin versant (Km)

A : Aire du bassin versant (Km²)

I.3.1.2 Rectangle Equivalent

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions (L et l) ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux de points de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés.

Le rectangle équivalent (longueur et largeur) peut être déterminé par les équations suivantes :

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right] \quad \text{Eq.1 2}$$

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{A}}{1.128} \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right] \quad \text{Eq.1 3}$$

Tableau I-1: Caractéristiques de forme du bassin versant d'oued Sikkak

Bassin	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle Equivalent		Forme
				Longueur (Km)	Largeur (Km)	
Oued Sikkak	221,68	83,35	1.60	27.45	14,48	Allongée

La valeur de l'indice de compacité de Gravelius montre que le bassin versant de l'oued Sikkak a une forme allongée, cela favorise une érosion linéaire et régressive.

I.3.1.3 Le coefficient de circularité du bassin

Le coefficient de circularité du bassin est le rapport de l'aire du bassin versant et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier. Il est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{Rci} = \frac{4 \cdot A \cdot \pi}{P^2} \quad \mathbf{Eq.14}$$

Avec Rci : Coefficient de Circularité.

A : la surface du bassin versant (km²).

P : le Périmètre du bassin versant (km).

Une valeur de 1 indique un cercle parfait, et une valeur tendant vers 0 caractérise une forme allongée.

Dans notre cas, Rci = 0,4, ce qui implique que la forme de notre bassin est allongée.

I.4 Etude du réseau hydrographique

L'oued Sikkak prend naissance à la source d'Ain Rhannous sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen. Il est un affluent rive gauche de l'oued Isser, qui est lui-même un affluent rive droite de la Tafna. Les deux rivières se rejoignent au Nord d'Ain Youcef.

L'oued Sikkak lui-même comprend deux principales branches à savoir :

- L'oued Sikkak proprement dit,
- L'oued Amyer, affluent rive droite, dont la confluence avec l'oued Sikkak se situe à l'Est d'Ain Youcef.

Les paramètres fondamentaux qui influent sur le régime hydrologique d'un cours d'eau comprennent : la densité de drainage (Dd) et le rapport de confluence (Rc)

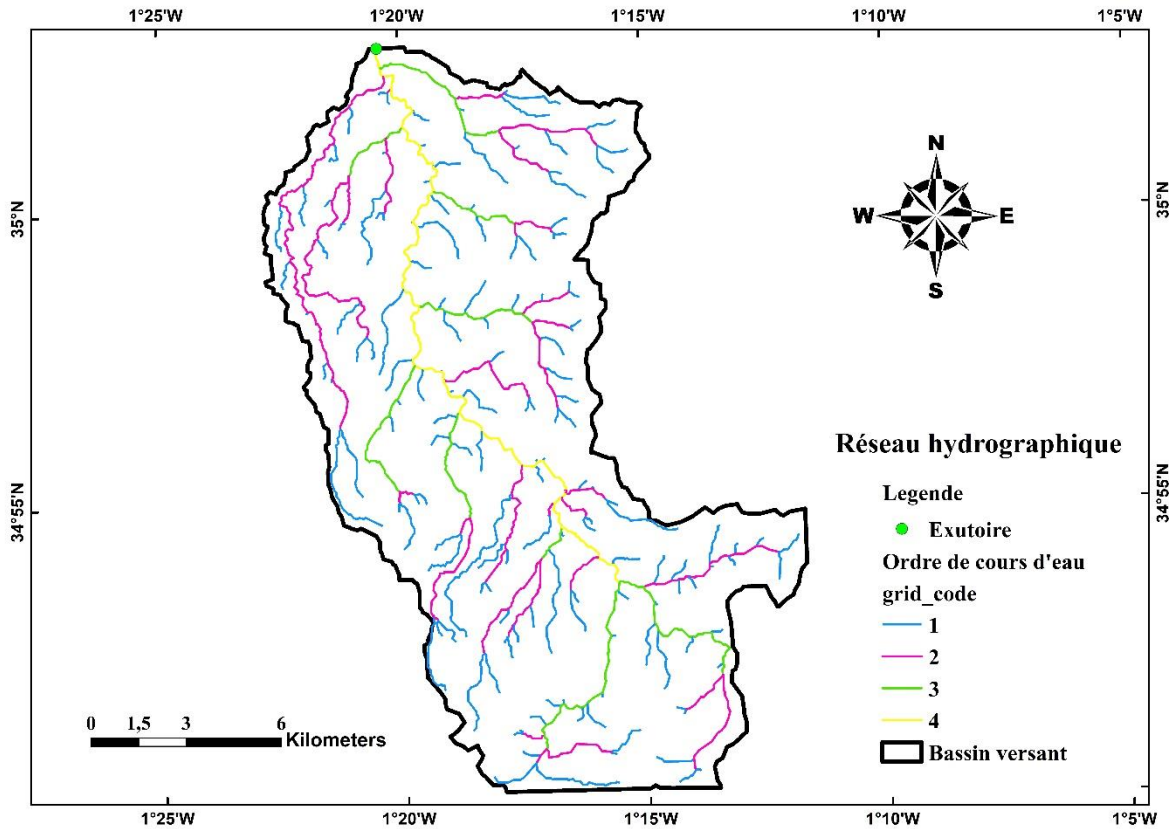


Figure I-2: Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Sikkak (Arcgis)

I.4.1 Densité de drainage

La densité de drainage est un paramètre hydrologique clé qui mesure le degré d'intégration du réseau hydrographique dans un bassin versant. Elle se définit comme le rapport entre la longueur totale des canaux d'écoulement (ruisseaux, rivières, cours d'eau) et la superficie du bassin versant. Elle s'exprime généralement en kilomètres par kilomètre carré (km/km²) et est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad \text{Eq.1 5}$$

Où Dd : densité de drainage en (Km/Km²).

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin (L= 284,20 Km).

A : aire du bassin en (Km²).

La densité de drainage est un indicateur important pour évaluer le potentiel d'écoulement des eaux et le risque de crues dans un bassin versant. Elle aide également à comprendre l'interaction entre les précipitations, l'infiltration et le ruissellement. Une densité de drainage élevée peut indiquer un risque accru d'érosion des sols et de crues rapides, tandis qu'une densité plus faible peut suggérer une plus grande capacité de rétention d'eau et d'infiltration, ce qui est bénéfique pour la recharge des nappes phréatiques.

Pour notre bassin, nous avons :

$$Dd=1,28 \text{ km/km}^2$$

La valeur obtenue de la densité de drainage ($D_d=1,28 \text{ km/km}^2$) montre que notre bassin versant est moyennement drainé. Ceci est dû essentiellement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par son aridité et ses pluies irrégulières et violentes. (Bouanani, 2004)

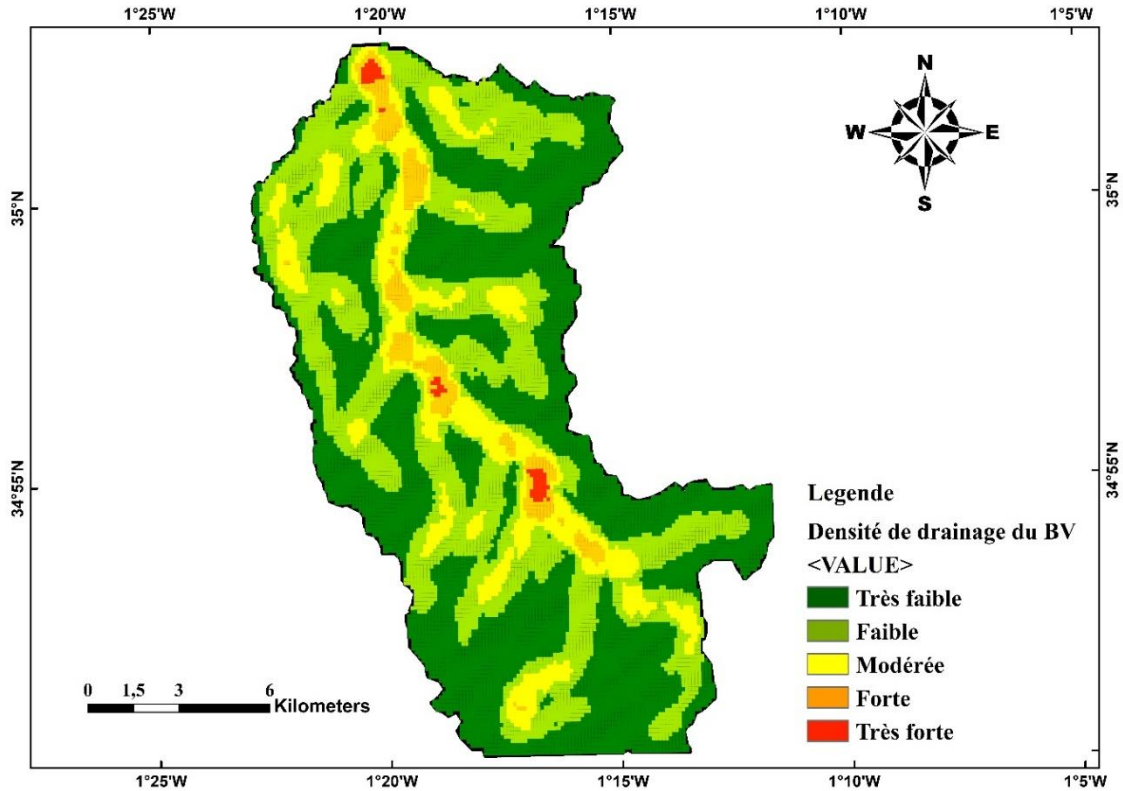


Figure I-3: Carte de la densité de drainage

I.4.2 Rapport de confluence

Il représente le quotient du nombre de thalwegs d'ordre N par celui supérieur.

Il est défini par :

$$R_c = N_n / N(n+1) \quad \text{Eq.1 6}$$

Où R_c : Rapport de confluence.

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n.

Tableau I-2: Rapport de confluence

Ordre	Nombre de thalwegs	R_c
1	152	4,9
2	31	3,44
3	9	9
4	1	/

$$R_{C(moy)} = 4,33$$

I.4.3 La fréquence des cours d'eau

La fréquence des cours d'eau, également appelée fréquence fluviale ou fréquence hydrographique, est un indicateur morphométrique qui représente le nombre total de cours d'eau dans un bassin versant par unité de surface. Elle permet d'évaluer l'intensité du réseau hydrographique, en mesurant combien de cours d'eau ou segments de rivières existent dans une région donnée. La fréquence des cours d'eau est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$F = N/A \quad \text{Eq.1 7}$$

Où :

- F : est la fréquence des cours d'eau (en nombre de cours d'eau par km²),
- N : est le nombre total de cours d'eau (ou segments de rivières) dans le bassin versant,
- A : est la superficie totale du bassin versant (en km²).

La fréquence des cours d'eau est un bon indicateur pour comprendre la capacité d'un bassin versant à drainer les eaux de pluie. Un réseau de cours d'eau dense, avec une fréquence élevée, est souvent associé à une réponse hydrologique rapide, ce qui peut augmenter le risque de crues soudaines après des événements pluvieux intenses. De plus, une fréquence élevée peut également être un signe d'érosion accrue, surtout dans les bassins versants où les sols sont fragiles et vulnérables aux processus érosifs.

Pour le bassin d'oued Sikkak, nous avons :

$$F = 0,87 \text{ cours d'eau par km}^2$$

Cette valeur est considérée moyenne à faible indiquant un faible développement du réseau hydrographique lié vraisemblablement aux facteurs aussi bien géologiques que climatiques non favorables.

I.5 Etude du relief

Le relief joue un rôle fondamental dans le régime hydrologique d'un bassin versant, influençant de manière directe l'écoulement, l'infiltration, et l'évaporation des eaux. En tant que facteur clé, il détermine la dynamique des processus hydrologiques à l'intérieur du bassin, tels que la vitesse de ruissellement, la capacité d'infiltration des sols, ainsi que la répartition spatiale des précipitations. L'analyse du relief à travers ces outils est fondamentale pour comprendre et modéliser le comportement hydrologique d'un bassin. Elle aide à prédire la réponse du bassin face aux précipitations, à évaluer les risques de crue et d'érosion, et à déterminer les zones où les mesures de gestion de l'eau (telles que la construction de barrages ou de bassins de rétention) seraient les plus efficaces. En outre, une bonne connaissance du relief est essentielle pour la planification de l'utilisation des terres, notamment dans les zones agricoles ou urbanisées, où l'infiltration et la gestion des eaux de ruissellement sont des enjeux majeurs. L'utilisation de la courbe hypsométrique et du diagramme de fréquence altimétrique permet une analyse approfondie de la distribution altitudinale.

I.5.1 Hypsométrie

La répartition altimétrique (tableau I-3) à partir de la carte permet d'établir la courbe hypsométrique et le diagramme des fréquences altimétriques (figure I-4).

La courbe hypsométrique fournie une vision synthétique du relief en représentant la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

La courbe hypsométrique (figure I-4) présente une inclinaison descendante, avec une forte pente observée aux altitudes élevées, suggérant la présence d'un plateau. En revanche, aux altitudes basses, la courbe montre une pente plus douce, révélant la présence d'une vallée encaissée. Cette configuration de la courbe est typique d'un bassin à l'équilibre, indiquant un potentiel érosif moyen.

Tableau I-3: Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sikkak

Altitudes	A _i (km ²)	A _i cumulées (km ²)	A _i (%)	A _i (%) cumulées	H _{i moy}
1100 - 1350	15,6	15,6	7,03	7,03	1225,00
1000 - 1100	11,27	26,87	5,08	12,11	1050,00
900 - 1000	9,15	36,02	4,12	16,23	950,00
800 - 900	15,97	51,99	7,19	23,42	850,00
700 - 800	15,74	67,73	7,09	31,51	750,00
600 - 700	21,18	88,91	9,54	40,05	650,00
500 - 600	24,78	113,69	11,16	51,21	550,00
400 - 500	31,52	145,21	14,2	65,41	450,00
300 - 400	43,59	188,8	19,63	85,04	350,00
180 - 300	32,87	221,67	14,81	100	240,00

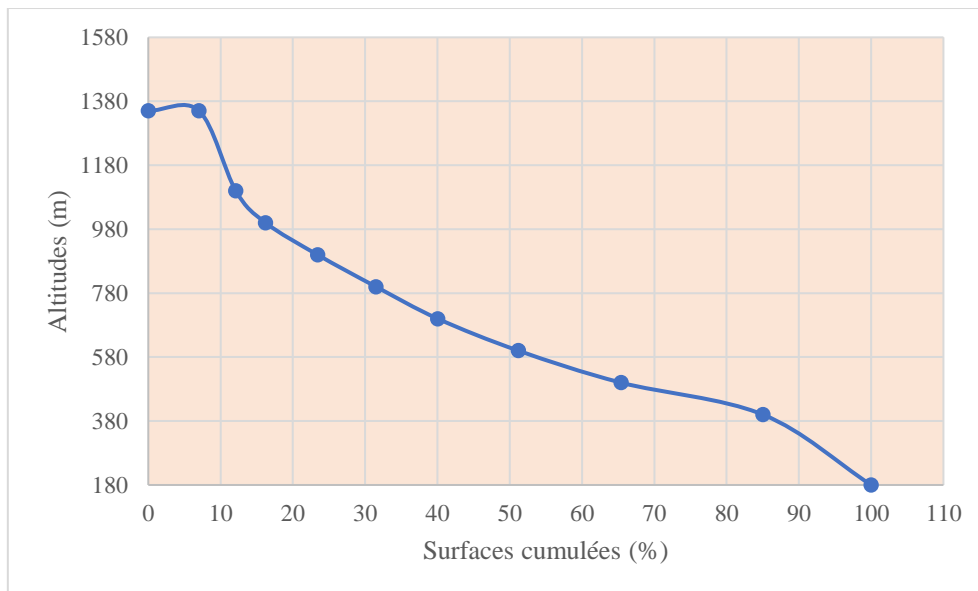


Figure I-4: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak.

D'après l'histogramme (figure I-5) l'altitude la plus fréquente se situe entre 400 et 300 mètres, ce qui constitue le pic du diagramme des fréquences altimétriques, représentant 19,63 % du total. Cette plage d'altitude correspond à la plaine d'Hennaya. En outre, on constate que l'altitude la moins fréquente se trouve entre 900-1000 mètres, occupant une surface de 4,12 %.

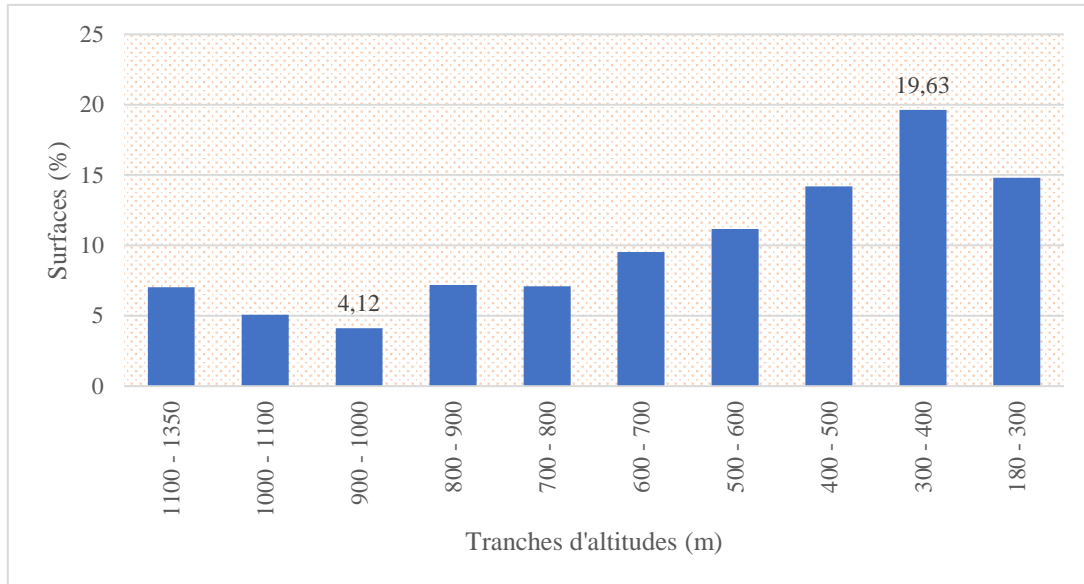


Figure I-5: Histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant de l'oued Sikkak

I.5.2 Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont utilisées pour évaluer les bassins versants (tableau I-4), fournissant ainsi des informations complémentaires sur la forme du relief et permettant l'évaluation de certaines pentes. Ces altitudes sont les suivantes :

- Altitude la plus fréquente : le maximum de la courbe des fréquences altimétriques,
- Altitude $H_{5\%}$: correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique,
- Altitude de fréquence à 95% : c'est l'altitude dépassée par 95% de la surface totale du bassin versant,
- Altitude moyenne : l'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.

L'altitude moyenne se calcule par la relation suivante :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{(A_i * H_i)}{A} \quad \text{Eq.1 8}$$

$$H_{\text{moy}} = 585,3 \text{ m}$$

Où H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m.)

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (km²).

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

A : Superficie totale du bassin versant (km²).

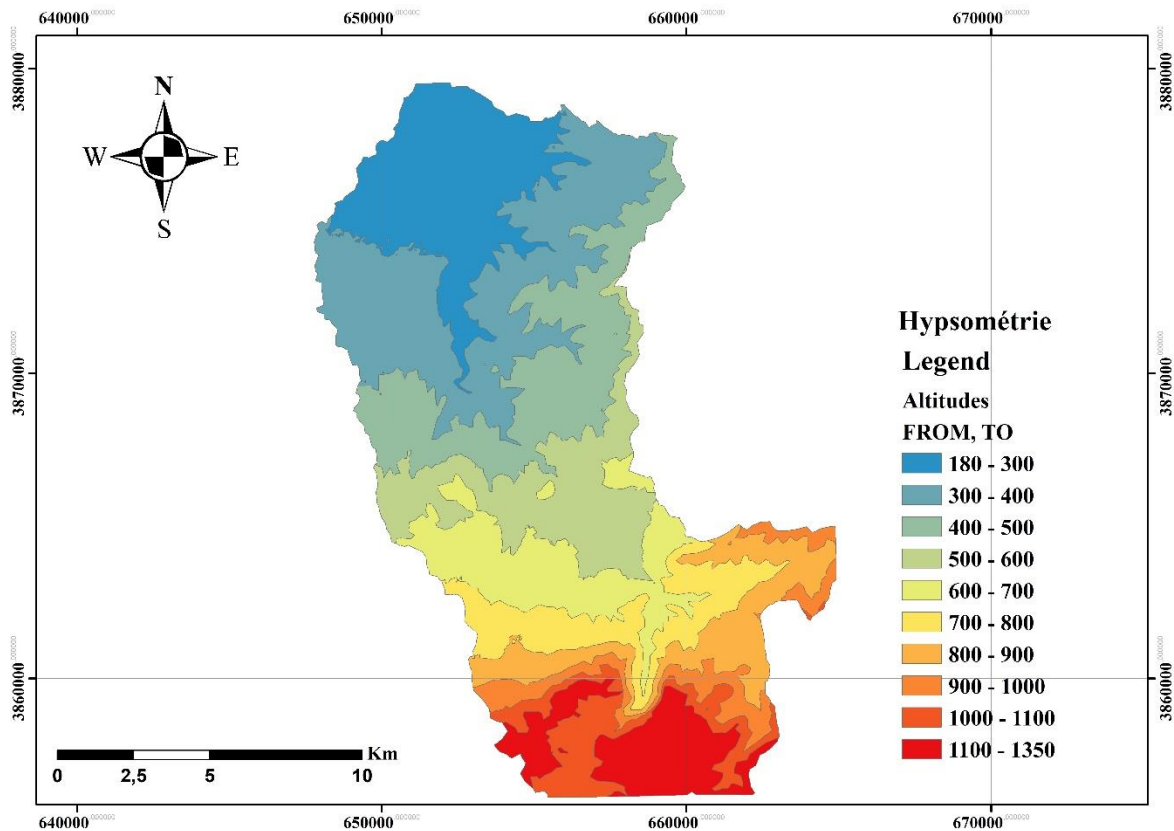


Figure I-6: Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Sikkak.

Tableau I-4 : Les Altitudes Caractéristiques du Bassin Versant d'Oued Sikkak.

Bassin versant	H _{max} (m)	H _{min} (m)	H _{moy} (m)	H _{5%} (m)	H _{95%} (m)	Altitude la plus fréquente (m)	Observation
Sikkak	1350	180	585,3	1350	350	300 à 400	Etat d'équilibre

I.6 Les indices de pente et relief

I.6.1 Etude des pentes

Le principal but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de faciliter des comparaisons et des classifications. Ils sont déterminés à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin.

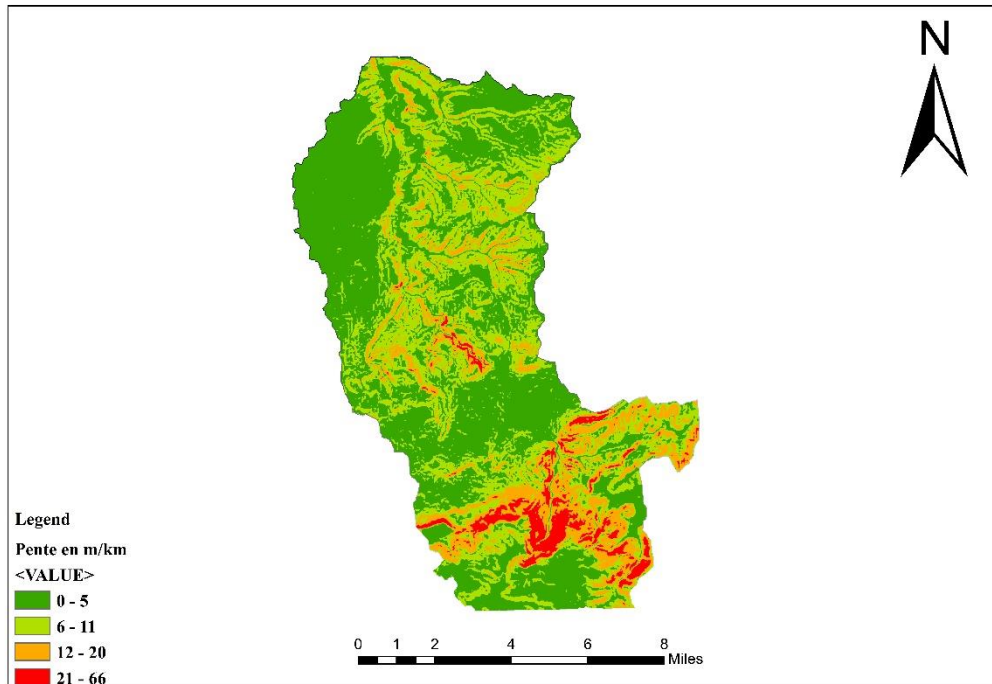


Figure I-7: Carte de pente du bassin versant

I.6.1.1 Indice de pente de Roche I_p

L'indice de pente I_p également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \sqrt{A_i (H_i - H_{i-1})} \quad \text{Eq.1 9}$$

$$I_p = 1,8\%$$

Avec : $(H_i - H_{i-1})$: Dénivelée entre deux courbes de niveau voisines (m).

L : longueur du rectangle équivalent (m).

A_i : surface partielle entre deux courbes de niveau. (Km²).

I.6.1.2 Indice de pente globale I_g

Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{Eq.1 10}$$

$$I_g = 0,036 \text{ m/km}$$

Avec :

I_g : Indice de pente globale. (m/km).

D : la dénivelée H 5 % - H 95 %.(m)

L : la longueur du rectangle équivalent (km).

Selon la classification de l'ORSTOM (tableau I-5), le bassin du Sikkak présente un relief assez fort.

Tableau I-5: Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM

Relief	I_g (m/km)
Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,5$
Relief très fort	$0,5 < I_g$

Pour atténuer l'influence de la surface sur l'indice de pente I_g , les chercheurs de l'ORSTOM ont introduit la dénivelée spécifique D_s .

I.6.1.3 Dénivelée spécifique D_s

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{A} \quad \text{Eq.1 11}$$

$$D_s = 506,22 \text{ m}$$

Avec :

I_g : Indice de pente global (m/km).

A : aire du bassin (km²).

En se rapportant à la classification de l'ORSTOM du relief selon D_s (tableau I-6), le bassin du Sikkak présente un relief très fort, car on est dans le cas où $D_s > 500$.

Tableau I-6: Classification du relief selon D_s par l'ORSTOM

Relief	Dénivelée spécifique (m)
Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$500 < D_s$

Tableau I-7: Indice de pente et Relief du bassin versant de Sikkak

Bassin	I_p	I_g (m/km)	Relief selon I_g	D_s (m)	Relief selon D_s
Sikkak	1,8%	0,036	Assez fort	506,22	Très fort

I.6.2 Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires que de la densité de drainage :

$$C_T = D_d * F_1 \quad \text{Eq.1 12}$$

$$C_T = 0,88$$

Avec : D_d : densité de drainage (km/km²)

F_1 : fréquence des thalwegs élémentaires $F_1 = N_1 / A$ et avec N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1.

I.6.3 Temps de concentration

Le temps de concentration d'un bassin versant représente la durée nécessaire pour qu'une particule d'eau provenant du point le plus éloigné du bassin atteigne l'exutoire. Il s'agit d'un paramètre clé en hydrologie, car il permet de déterminer le délai de réponse du bassin à un événement pluvieux, et donc d'évaluer le risque de crue et de concevoir des infrastructures de gestion des eaux.

La formule de Giandotti est une méthode largement utilisée pour estimer le temps de concentration d'un bassin versant, en prenant en compte des facteurs tels que la superficie du bassin, la longueur maximale du cours d'eau, et la différence d'altitude entre les points les plus élevés et les plus bas du bassin.

$$T_C = \frac{(4 * \sqrt{A + 1.5 * L})}{0.8 * \sqrt{H}} \quad \text{Eq.1 13}$$

$$T_C = 4\text{h } 05\text{min}$$

Avec : T_c : temps de concentration (heures).

A : superficie du bassin (km²).

L : longueur du thalweg principal ($L = 26,16$ Km).

H : Dénivelée $H_{moy} - H_{min}$ (m).

Tableau I-8: Valeurs du coefficient de torrentialité et du temps de concentration des eaux du bassin versant d'oued Sikkak

Bassin	C_T	T_C
Sikkak	0,88	4 Heures 05 min

I.6.4 Étude du profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau est une représentation graphique qui montre la variation de l'altitude du lit d'un cours d'eau en fonction de la distance depuis sa source jusqu'à son exutoire (généralement un lac, une mer ou une confluence avec une autre rivière). Ce profil permet d'illustrer le comportement hydrologique et morphologique du cours d'eau, et il est essentiel pour comprendre les processus d'érosion, de transport de sédiments, et de dépôt tout au long du cours d'eau.

Pour oued Sikkak, la longueur du cours d'eau principal est de 26.16 km, et présente des variations de pente assez importantes.

Tableau I-9: calcul des pentes de chaque Tronçon. (Berrezoug et Kissi, 2002)

Altitudes (m)	Distance cum (Km)	Pentes (%)
1100	0	
1100-770	1,75	18,85
770-651	2,5	15,86
651-520	10	1,74
520-400	14	3
400-300	18	2,5
300-260	23,8	0,68
260-200	33	0,65
200-182	35	0,02

Le profil en long (figure I-5), montre que :

- Une forte pente de Ain El Ourit jusqu'à Aïn Safra de l'ordre de 19 %.
- Une rupture de pente au niveau d'Aïn Safra à 650m d'altitude due probablement à un changement de facies accompagné de la présence d'une faille.
- Une faible pente de Ain Safra jusqu'à Oued Boughrara de l'ordre de 3 %
- Une pente très faible d'Oued Boughrara jusqu'à Barrage Sikkak de l'ordre de 0.025 %

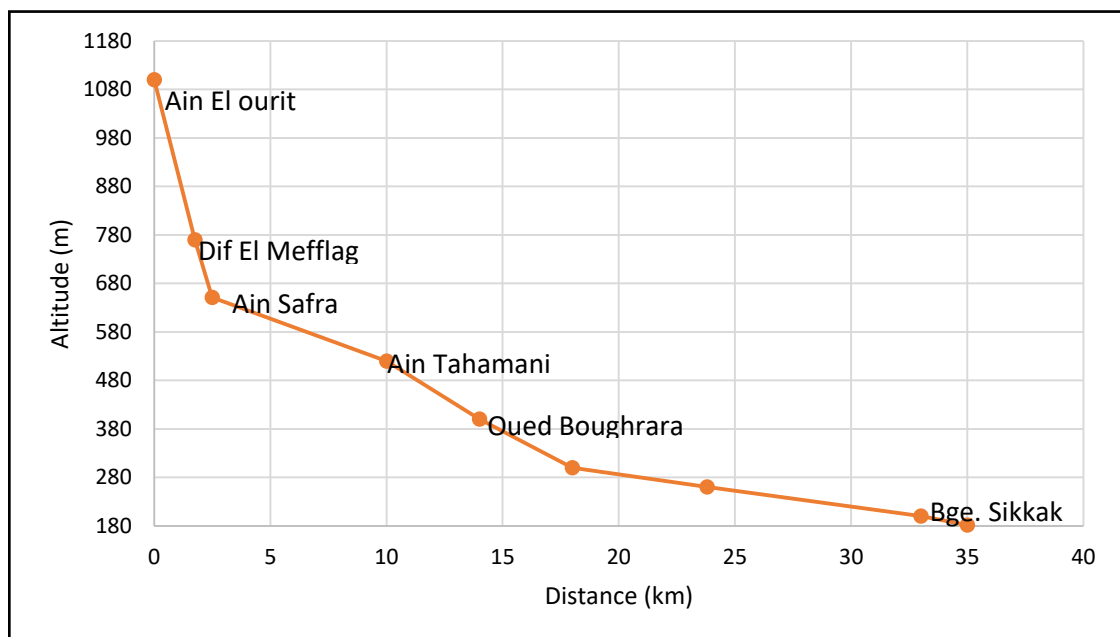


Figure I-8: Profil en long d'Oued Sikkak. (Berrezoug et Kissi, 2002)

I.7 Sol et végétation

La végétation est un facteur capital qui influe sur la rapidité d'écoulement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin.

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une petite couverture forestière. Les grès de Boumediene sont caractérisés par la présence des forêts d'Hafir et Zarifet. Les marnes kimméridgiennes, miocènes et les alluvions quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles. Les broussailles occupent une petite surface dans notre bassin, concentrées dans la région de la commune d'Ain Fezza et au djebel Ain El Hout.

Une plantation d'oliviers couvre une partie de la plaine qui s'étend de Tlemcen à Hennaya, de Saf Saf à Mansourah. A son abri s'étagent en gradins les jardins irrigués qui produisent des légumes et des fruits à côté de l'oued Sikkak. (Hayane, S.M., 1983)

La carte d'occupation du sol (figure I-9) montre que le bassin versant de l'oued Sikkak couvre une diversité des cultures dont les zones agricoles (y compris l'arboriculture) suivie de la forêt moyennement dense, des sols nus, quelques points d'eau.

Tableau I-10: Distribution du couvert végétal dans le bassin d'Oued Sikkak

Occupation des sols	Surfaces en km ²	% des surfaces
Eau	1,79	0,81
Sols nus	132,64	59,75
Zones agricoles	70,33	31,68
Foret	16,92	7,62

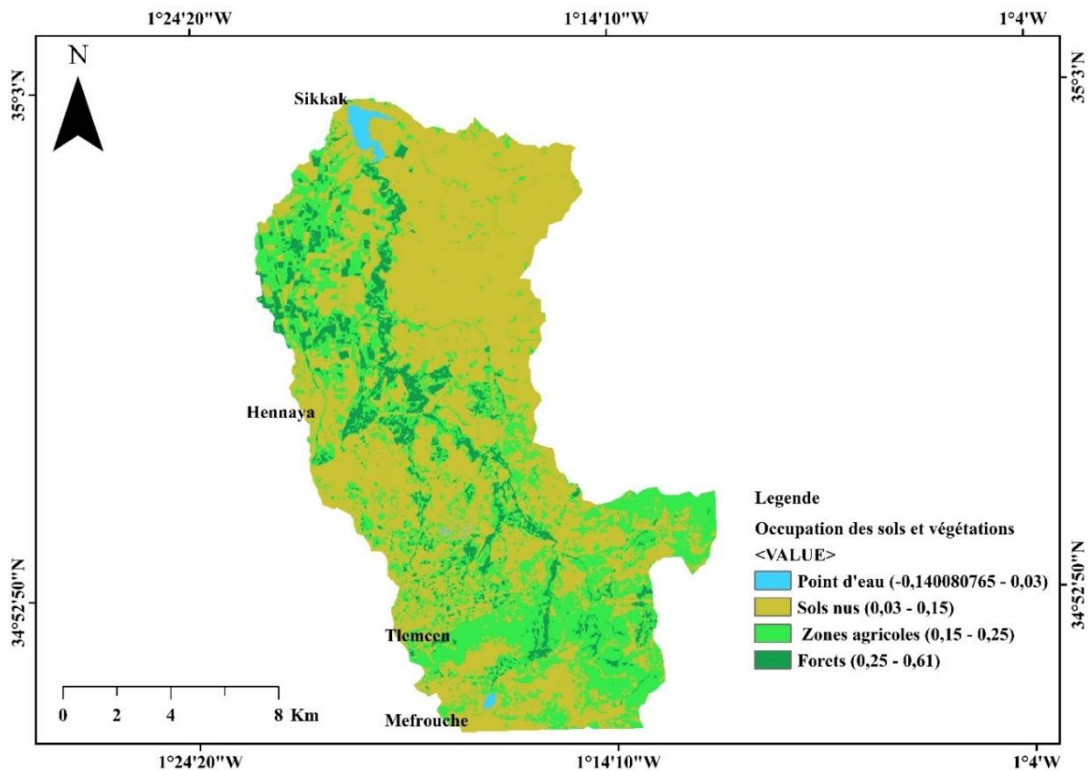


Figure I-9: Carte d'occupation de sol du bassin versant d'oued Sikkak

I.8 Etude géologique

I.8.1 Introduction

La composition géologique joue un rôle capital sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport des sédiments. Les roches se divisent en matériaux meubles tels que les sables, les argiles et les marnes, et en roches consolidées comme les grès, les calcaires et les dolomies. La nature des couches rocheuses affecte l'écoulement de surface et la formation des dépôts alluvionnaires.

Dans cette partie, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie du bassin du Sikkak en se basant sur la synthèse des travaux de **Hayane 1983**. Cela nous permet de connaître les formations géologiques de notre zone d'étude.

En Oranie, nous avons du Nord au Sud : le domaine Tellien, le domaine Tlemcenien, les hautes plaines oranaises, le domaine Atlasique, le domaine Saharien.

Les Monts de Tlemcen dessinent la bordure sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définie à savoir :

- ✓ Le domaine des nappes du Tell au Nord
- ✓ Et le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

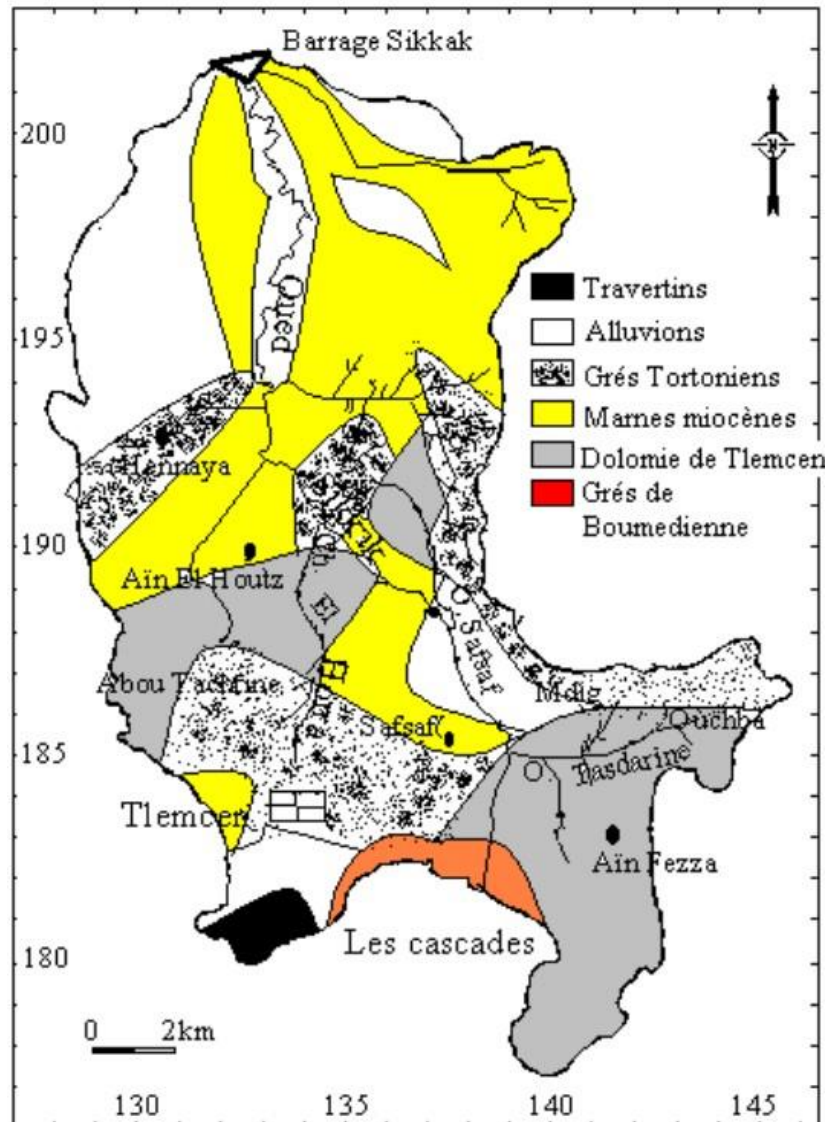


Figure I-10: Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sikkak. (Bouanani, A, 2004)

I.8.2 Les formations secondaires

I.8.2.1 Les grés de Boumediene

Ce sont des grés à éléments fins sous forme de gros bancs séparés par des inter-lits argileux, le ciment presque toujours calcaire. L'épaisseur moyenne de cette formation est de 200 à 400m.

I.8.2.2 Les calcaires de Zarifet

Cette formation tire son nom du col de Zarifet situé à 5 Km au Sud-Ouest de Tlemcen. Elle est peut-être réduite ou partiellement dolomitique, avec une épaisseur d'environ 100m au col de Zarifet.

I.8.2.3 Les dolomies de Tlemcen

Cette formation correspond au grand escarpement dolomitique qui domine Tlemcen et encercle le cirque des cascades. Les dolomies qui la composent sont parfois de structure grossièrement

crystalline en raison d'une dolomitisation tardive. Elle affleure au djebel Tefatisset, Ain El-Houtz et Oudjlida. Son épaisseur peut atteindre 300m dans la région de Tlemcen.

I.8.3 Les formations tertiaires

I.8.3.1 Eocène

Ce sont des grés fissurés à ciment argileux alternant avec des marnes verdâtres, leur épaisseur est de 50m. Elles affleurent dans la vallée d'Oued Sikkak.

I.8.3.2 Le Miocène marin

Le Miocène marin se développe presque uniquement sur le versant Nord des monts de Tlemcen. Il est discordant sur les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur. Il s'agit de dépôt argilo-gréseux, autochtones.

I.8.3.3 Le Pliocène

Il est marqué par des conglomérats de base, à éléments bien roulés de l'Oxfordien et du Kimméridgien peu développé en surface.

I.8.4 Les formations quaternaires

I.8.4.1 Les alluvions anciennes

✓ Le complexe de piémont

Ce complexe est représenté par des éboulis de piémonts plus ou moins en croûtes, d'épaisseur assez faible.

✓ Les travertins

Les dépôts de travertin résultent de la dissolution interne des formations calcaires et dolomitiques, favorisée par la forte teneur en carbonate de calcium des eaux émergeant des sources. Ils constituent de puissants dépôts pouvant atteindre 60m (Lalla-Setti au Sud de Tlemcen, et Ain Fezza). (**Hayane, 1983**)

✓ La croûte calcaire

Cette croûte est formée par un encroûtement particulièrement bien marqué dans la plaine d'Henaya où il masque partiellement les grés Tortonien. Cette croûte, de couleur claire et présentant des structures lamellaires, se caractérise par son faible épaisseur qui ne dépasse pas 1m.

✓ Le glaciaire de pente Soltanienne

Il s'agit de formation soltanienne, le plus souvent limono-argileuse. La partie de marne non atteinte par les érosions récentes forme de grands glacis de sol rouges.

I.8.4.2 Les alluvions récentes

Il s'agit de sédiments limoneux situés dans les zones les plus basses des plaines et des vallées près des cours d'eau.

Conclusion

Le tableau ci-après résume tous les paramètres physiques de notre bassin versant.

Tableau I-11: Récapitulatif des principaux paramètres du bassin versant d'oued Sikkak.

Paramètres	Bassin du bassin versant
Superficie (km ²)	221,68
Périmètre (km)	83,35
Indice de compacité (K _c)	1,60
Longueur du Rectangle équivalent (km)	27,45
Largeur du rectangle équivalent (km)	14,48
Densité de drainage (km/km ²)	1,28
Rapport de confluence (R _c)	4,33
Altitude maximale (m)	1350
Altitude minimale (m)	180
Altitude moyenne (m)	585,3
Indice de pente de Roche (I _p)	1,8%
Indice de pente globale I _g (m/km)	0,036
Dénivelée spécifique D _s (m)	506,22
Coefficient de torrentialité (CT)	0,88
Temps de concentration T _C (heures)	4 Heures 05 min

Parmi les paramètres énumérés dans ce tableau nous avons :

- La valeur de l'indice de compacité (K_C) montre que la forme de notre bassin versant est allongée ;
- Les valeurs d'I_p (1,8%) et I_g (0,036 m/km) indiquent que le bassin versant d'oued Sikkak, présente un relief assez fort ;
- Et la valeur de la densité de drainage (1,28 km/km²) montre que le bassin versant est moyennement drainé.

Chapitre II Hydro-climatologie

Introduction

Le climat désigne l'ensemble des facteurs météorologiques (des variables comme la température, les précipitations et le vent) qui caractérisent un endroit à une période donnée. Il est influencé par une série de paramètres notamment la circulation atmosphérique, le relief et l'éloignement par rapport à la mer. Les caractéristiques climatiques sont déterminées à partir des données recueillies par les réseaux de mesure pluviométrique et climatique implantés dans la région du bassin. Ce chapitre vise à analyser les éléments caractéristiques du climat tel que les précipitations et les températures enregistrées dans notre zone d'étude, ainsi qu'à les classer afin d'identifier le type de climat prédominant dans la région et d'analyser l'évolution des apports pluviométriques au bassin.

II.1 Aperçu sur le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé.

L'Atlas tellien agit comme une barrière, incitant la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents du nord-ouest de l'atlantique. L'altitude exerce une influence significative sur les conditions climatiques, avec une baisse de température générale et une augmentation des variations quotidiennes et annuelles en raison de l'éloignement de la mer. Ainsi le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige occasionnelles et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques. (Bouanani, 2004)

II.2 Etude de la pluviométrie

La pluviométrie désigne la mesure de la quantité des précipitations (principalement de pluie) tombée sur une région donnée pendant une période de temps spécifique, généralement exprimée en millimètre. Elle est un facteur important car elle influence de nombreux aspects de la vie humaine et de l'écosystème, notamment l'agriculture, la disponibilité de l'eau, l'économie et même le climat régional. Elle aide à déterminer les cycles saisonniers, à prévoir les sécheresses ou les inondations.

D'après (Bouanani. A, 2004), plusieurs auteurs ont étudié la pluviométrie en Algérie, notamment P. Seltzer (1913-1938), H. Gaussen (1918-1947), G. Medinger (1913-1953), M. Chaumont et C.Paquin (1913-1963). Les données des stations météorologiques du bassin ont été interrompues pendant la guerre d'Algérie, et certaines stations ont été déplacées après 1962.

Ces interruptions et modifications ont conduit à la présence de lacunes dans les données, tant au niveau mensuel qu'annuel. Toutefois il est à noter que le bassin versant de la Tafna et parmi les zones les plus dotées de stations pluviométriques et météorologiques en Algérie.

II.2.1 Répartitions des stations pluviométriques de la zone d'étude

Le bassin versant de l'oued Sikkak comprend, dans sa partie amont, des stations pluviométriques telles que Mefrouche et Tlemcen. Pour caractériser de manière précise le climat de ce bassin versant, nous avons inclus une quatrième station pluviométrique située à proximité de la limite géographique de la zone d'étude, à savoir la station d'Hennaya.

Nous avons pris en compte les données des précipitations et des températures enregistrées aux différentes stations situées à proximité de notre zone d'étude. En analysant les informations collectées, nous pouvons fournir une évaluation assez précise des conditions climatiques du bassin de l'oued Sikkak et mieux comprendre les variations météorologiques qui influencent cette zone.

Tableau II-1: caractéristiques des stations pluviométriques

Stations	X (km)	Y (km)	Altitude (m)	Code de station	Paramètres mesurés
Mefrouche	135,55	180,2	1110	160701	Pluie Température- évaporation
Tlemcen	132,35	182,65	830	160724	Pluie Température- évaporation
Hennaya	126,7	188,2	510	160516	Pluie
Sikkak Bge	151,7	201,7	220	160704	Pluie température- évaporation

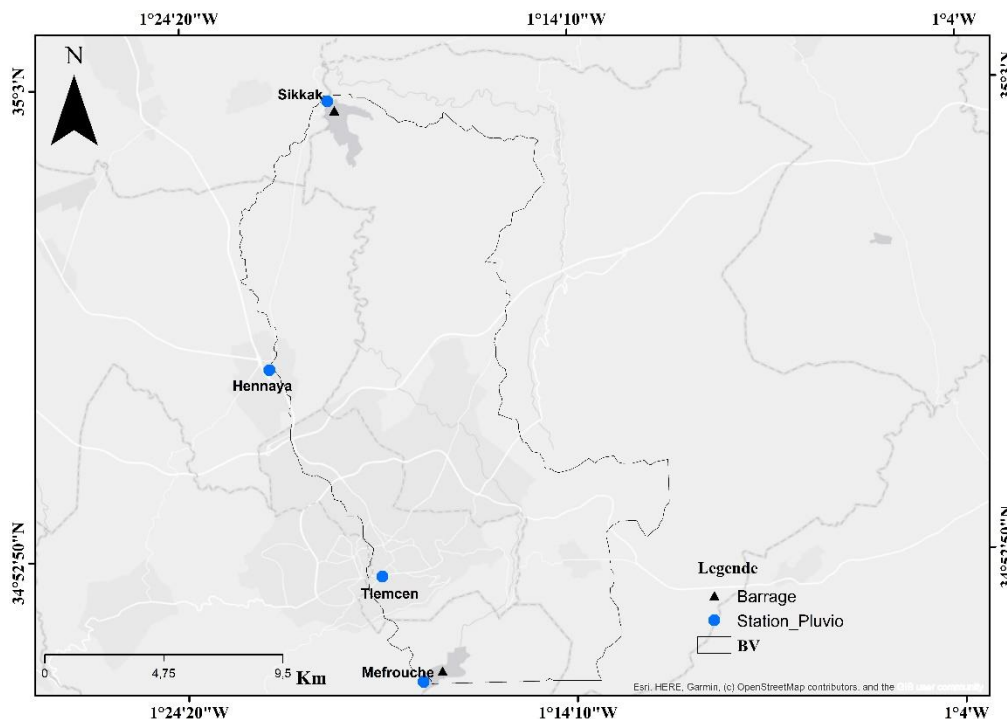


Figure II-1: Localisation des différentes stations pluviométriques

II.2.2 Variation annuelle de la pluviométrie

La pluviométrie d'une année est définie par la somme de la hauteur des précipitations mensuelles. La mesure de la variabilité de la pluviométrie sur une période donnée peut être réalisée grâce à la moyenne interannuelle.

Tableau II-2: Pluviométrie annuelle (mm) aux différentes stations pluviométriques (1982/1983-2022/2023).

Années	Hennaya	Tlemcen	Mefrouche	Sikkak
1982/1983	272,6	298,8	366,6	272,5
1983/1984	294,3	334,8	413,4	285,2
1984/1985	309,2	348,4	431,9	298,8
1985/1986	430,4	480,3	589,1	414,4
1986/1987	433,8	475	583,2	419,1
1987/1988	327,5	364	446,6	322
1988/1989	327,8	364,9	448,7	301,2
1989/1990	369,4	409,4	497,7	350,5
1990/1991	466,7	521,7	642	441,2
1991/1992	482,6	542,3	674,2	442,2
1992/1993	313,4	343	412,3	293
1993/1994	333,9	366,1	446,6	322,1
1994/1995	325,3	363,9	448,2	309,3
1995/1996	474,1	536,1	661,5	453,9
1996/1997	279,3	308	371,1	261,9
1997/1998	356,9	395,2	483,3	337,4
1998/1999	265,5	294,9	361,7	261,4
1999/2000	288,2	318	389,9	281,9
2000/2001	413,7	454	555,2	409
2001/2002	417,4	457,8	558,6	394,3
2002/2003	418,2	464,3	569,8	401,9
2003/2004	489,5	543,1	666	463,7
2004/2005	351,3	387,1	472	347,2
2005/2006	377	421,9	519,8	363,7

2006/2007	359,1	398,1	476,4	341,8
2007/2008	361,5	395,3	487,7	356,1
2008/2009	583,7	644	788,5	568,1
2009/2010	481,7	537,3	656,2	452,4
2010/2011	368	410,2	504,9	348
2011/2012	383,2	423,3	517,6	373,6
2012/2013	565,1	624,7	763	541,6
2013/2014	387,3	438,1	546	375,8
2014/2015	454,5	509,8	628,3	439,4
2015/2016	300,7	336	411,9	281,4
2016/2017	381,7	431	537	364,4
2017/2018	475,2	534,1	653,7	447,6
2018/2019	341	378,4	465,5	327,3
2019/2020	350,1	386,9	474,1	328,6
2020/2021	268,6	305,8	379,7	262,2
2021/2022	298	329,9	401,2	289,4
2022/2023	203	243,4	316,5	198,3
Moyenne	375	417,5	512,6	359,6

Les graphiques (figure II-2) révèlent une similitude notable dans les variations annuelles des précipitations observées aux quatre stations pluviométriques étudiées. Les stations de Hennaya et Sikkak présentent des fluctuations presque identiques, ce qui s'explique par leur proximité altitudinale. La station de Tlemcen, quant à elle, affiche des valeurs qui semblent correspondre à une moyenne des trois autres stations, montrant une certaine stabilité par rapport aux variations observées (figure II-2). En revanche, la station de Mefrouche présente un léger décalage par rapport aux autres stations, principalement dû à son altitude plus élevée.

Cette disparité dans les mesures de précipitations peut être attribuée aux différences topographiques et altitudinales entre les stations. Les précipitations ont tendance à augmenter avec l'altitude en raison de la condensation accrue dans les zones plus élevées, ce qui explique pourquoi la station de Mefrouche enregistre des valeurs légèrement décalées par rapport aux autres stations situées à des altitudes plus basses.

L'analyse des courbes de précipitations met également en évidence une variabilité importante d'une année à l'autre, avec des années particulièrement humides alternant avec des périodes de précipitations plus faibles. Cette irrégularité reflète la variabilité climatique naturelle de la

région, où les conditions météorologiques peuvent varier de manière significative sur une base interannuelle.

En comparant les précipitations moyennes interannuelles des différentes stations, il est clair que la station située au barrage de Sikkak enregistre des niveaux de précipitations inférieurs à ceux des autres stations. Ce constat est cohérent avec la position topographique de la station de Sikkak, située à une altitude relativement plus basse par rapport aux autres, ce qui réduit la quantité de précipitations reçues. L'altitude joue donc un rôle déterminant dans la distribution des précipitations à travers la région.

Développement et implications :

Cette analyse met en lumière l'importance des caractéristiques géographiques et altitudinales dans la distribution spatiale des précipitations. En hydrologie, l'altitude est un facteur clé qui influence non seulement les précipitations mais aussi d'autres processus hydrologiques comme l'écoulement de surface, l'infiltration et l'évaporation. Les stations situées à des altitudes plus élevées, comme celle de Mefrouche, reçoivent généralement plus de précipitations en raison de la condensation accrue de la vapeur d'eau lorsqu'elle monte et refroidit à des altitudes plus élevées.

Le fait que la station du barrage de Sikkak enregistre des précipitations plus faibles peut avoir des implications sur le remplissage du barrage, la disponibilité des ressources en eau, et la gestion des bassins versants dans la région. Une meilleure compréhension de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations est essentielle pour les gestionnaires de l'eau afin de garantir une gestion durable des ressources hydriques, surtout dans les régions semi-arides comme celle-ci, où l'eau est une ressource précieuse.

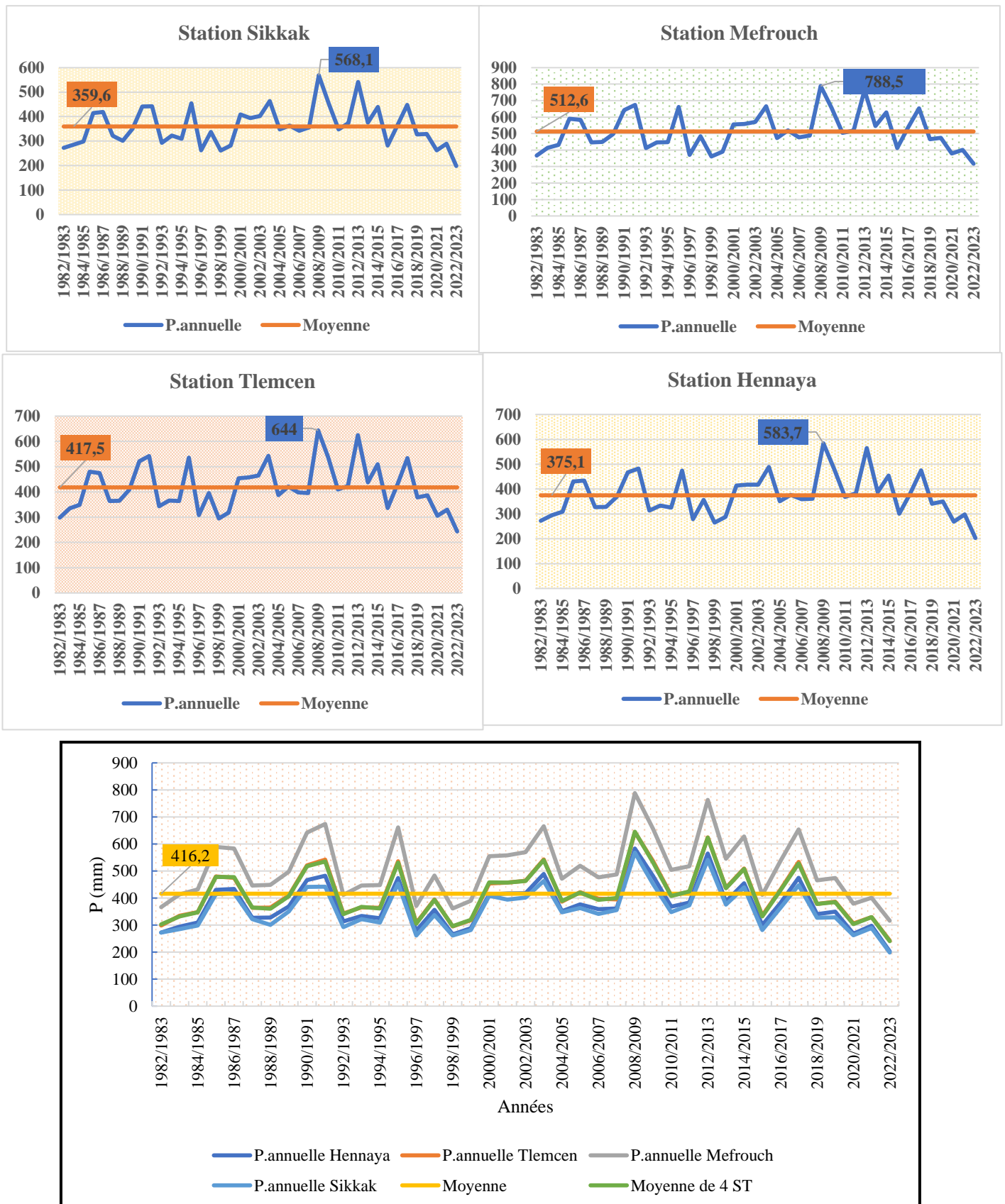


Figure II-2: Variation annuelle des précipitations aux différentes stations pluviométriques.

Tableau II-3: Les caractéristiques des précipitations (minimales, moyennes et maximales) des stations

Station	Min	Moy	Max
Sikkak	198,3	359,6	568,1
Hennaya	203	375,1	583,7
Tlemcen	243,4	417,5	644
Mefrouche	316,6	512,6	788,5

La figure II-3 présente les principales caractéristiques des précipitations annuelles (minimales, moyennes et maximales) des quatre stations étudiées indiquant clairement que les pluies minimales sont enregistrées à la station du barrage de Sikkak, par contre celles maximales sont observées au niveau du Mefrouche.

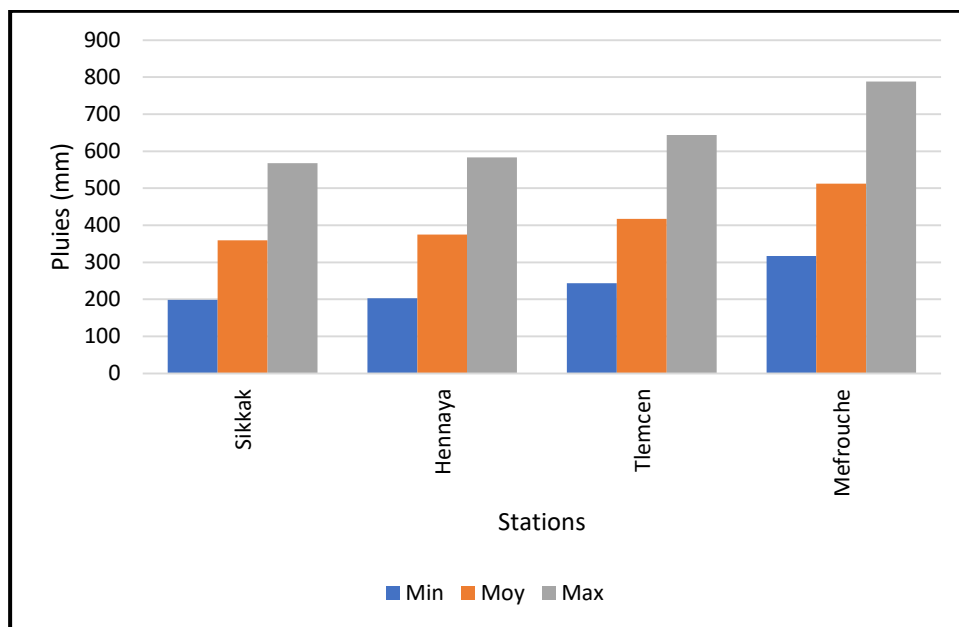


Figure II-3: Précipitations moyennes interannuelles, minimales et maximales des stations.

II.2.3 La variation moyenne mensuelle de la pluviométrie

La répartition mensuelle des précipitations concerne la pluviométrie enregistrée durant une année hydrologique qui débute du mois de septembre jusqu'au mois d'aout de l'année suivante.

Tableau II-4: Précipitations moyennes mensuelles aux différentes stations (1982/1983-2022/2023).

Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avl	Mai	Juin	Juil	Aout
Sikkak	18,8	33,4	58,1	49,9	53,9	46,3	33,9	31,3	23,1	6,9	1,5	2,6
Hennaya	19,8	32,3	57,7	49,7	54,7	46,0	40,1	35,0	26,5	7,6	2,2	3,5
Tlemcen	21,9	33,4	62,4	55,6	62,0	50,9	46,3	37,7	31,5	9,8	2,3	3,6
Mefrouche	26,4	40,3	78,4	67,9	77,6	60,5	58,0	41,9	39,7	14,1	3,2	4,6
Moyenne	21,7	34,9	64,1	55,8	62,1	50,9	44,6	36,5	30,2	9,6	2,3	3,6

Le graphique de la figure II-4 illustre que les précipitations moyennes mensuelles atteignent leur maximum en novembre (environ 64 mm) et en janvier (environ 62 mm), faisant de ces mois les plus pluvieux de l'année. Les précipitations restent élevées en décembre, mais elles commencent à diminuer progressivement à partir de mars. Les mois de juin, juillet et août sont les plus secs, avec des précipitations presque nulles, en particulier en juillet où elles ne dépassent que légèrement 2 à 3 mm. À partir de septembre, les précipitations augmentent progressivement, culminent en hiver, puis diminuent de nouveau jusqu'à atteindre les niveaux les plus bas en été.

Cette tendance est caractéristique des climats méditerranéens, qui se distinguent par des hivers humides et des étés secs. Le pic des précipitations en hiver et la baisse marquée en été sont typiques de ce type de climat, influencé par la circulation atmosphérique, où des systèmes dépressionnaires dominant en hiver, apportant des pluies abondantes, tandis que les hautes pressions en été bloquent l'arrivée des précipitations.

Cette répartition saisonnière des précipitations peut également être influencée par les changements climatiques, qui entraînent une variation des températures moyennes et affectent les régimes de précipitations. Les études montrent que le réchauffement climatique peut entraîner des hivers plus doux, réduisant ainsi les précipitations hivernales et, par conséquent, la disponibilité des ressources en eau. Cette réduction des précipitations hivernales, couplée à des étés de plus en plus chauds et secs, pourrait aggraver les tensions hydriques dans la région.

La diminution des précipitations, particulièrement en été, a un impact direct et significatif sur la gestion des ressources en eau, en particulier dans le cadre de la gestion des barrages. Les barrages, qui jouent un rôle crucial dans la régulation des flux d'eau et la disponibilité de l'eau pour l'agriculture, l'industrie et la consommation domestique, dépendent largement des apports en eau provenant des précipitations hivernales pour maintenir des niveaux de réservoirs adéquats.

Lorsque les précipitations diminuent, la quantité d'eau stockée dans les réservoirs diminue également, ce qui peut entraîner des pénuries d'eau, en particulier pendant les mois d'été où la demande en eau est élevée en raison de l'irrigation agricole et des besoins domestiques accrus.

Les graphiques de la figure II-4 ne se contentent pas de montrer une tendance météorologique saisonnière, mais soulignent également l'importance d'une gestion proactive des ressources en eau dans un climat de plus en plus variable et incertain.

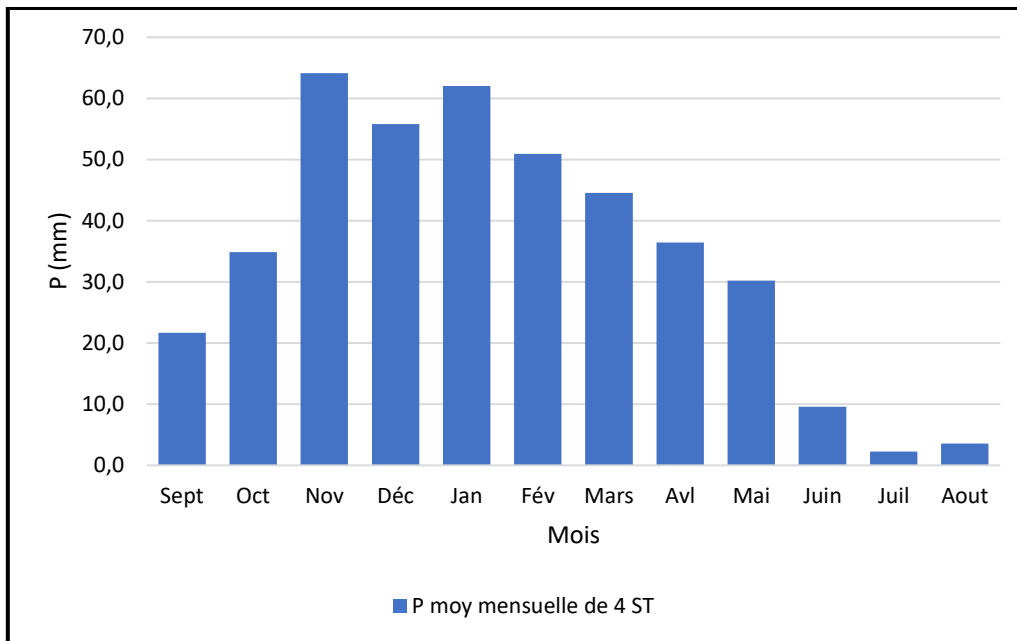


Figure II-4: Variation moyenne mensuelle des précipitations aux différentes stations

II.2.4 La variation moyenne saisonnière de la pluviométrie

Il est essentiel d'étudier de la pluviométrie enregistrée durant les quatre saisons pour connaître sa variation. Les quatre (4) saisons de l'année comprennent :

- Automne (septembre, octobre et novembre) ;
- Hiver (Décembre, janvier et février) ;
- Printemps (mars, avril et mai) ;
- Été (juin, juillet et aout).

Tableau II-5: Pluviométrie moyenne saisonnière aux différentes stations (1982/1983-2022/2023).

Stations	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Sikkak	110,3	150,1	88,2	11,0
Tlemcen	117,7	168,6	115,5	15,7
Hennaya	109,8	150,4	101,6	13,4
Mefrouche	145,0	206,0	139,6	21,9
Moyenne (mm)	120,7	168,8	111,2	15,5

La variation des précipitations moyennes saisonnières des quatre stations (figure II-6) montre clairement que l'hiver est la saison la plus arrosée, avec une moyenne de 169 mm de précipitations. Il est suivi de l'automne et du printemps, qui enregistrent des précipitations relativement similaires, avec des moyennes respectives de 121 mm et 111 mm. En revanche, l'été est la saison la plus sèche, avec une pluviométrie moyenne extrêmement faible, n'atteignant que 16 mm.

Cette répartition des précipitations est typique des climats méditerranéens, où les saisons humides se concentrent principalement en automne, hiver et printemps, tandis que l'été est caractérisé par des périodes prolongées de sécheresse. L'hiver, avec ses systèmes météorologiques dominés par des dépressions venant de l'Atlantique, est naturellement la saison la plus humide. Le printemps et l'automne, bien que moins pluvieux que l'hiver, conservent encore une humidité significative due à la transition des systèmes météorologiques. Par contre, l'été est dominé par des conditions anticycloniques qui empêchent les précipitations et favorisent un climat sec.

Les différences marquées entre les saisons, en particulier entre l'hiver humide et l'été sec, ont des implications directes sur le cycle hydrologique de la région. Les précipitations hivernales, essentielles pour la recharge des nappes phréatiques et le remplissage des barrages, assurent la disponibilité en eau pendant les mois plus secs. Si cette période de recharge est perturbée par une diminution des précipitations, cela peut avoir un impact négatif sur la gestion des ressources en eau tout au long de l'année.

Les précipitations enregistrées en automne et au printemps, bien que plus faibles que celles de l'hiver, jouent également un rôle important dans la régulation des écoulements des cours d'eau et la disponibilité en eau pour les besoins agricoles et domestiques. Une pluviométrie soutenue pendant ces saisons permet de prolonger la période de disponibilité des ressources en eau avant l'arrivée de l'été, où la demande en eau augmente en raison des températures élevées et de l'évapotranspiration accrue.

L'été, avec ses faibles précipitations moyennes de seulement 16 mm, représente un véritable défi pour la gestion des ressources en eau. Pendant cette saison, la rareté des précipitations, couplée à une demande accrue en eau pour l'agriculture et la consommation domestique, accentue les risques de pénuries d'eau. La gestion rationnelle des réserves d'eau accumulées durant les autres saisons devient alors nécessaire pour éviter la surexploitation des ressources.

Ces variations saisonnières soulignent l'importance d'une planification stratégique pour garantir une utilisation rationnelle des ressources en eau, en particulier dans des régions où le climat méditerranéen impose des périodes prolongées de sécheresse estivale.

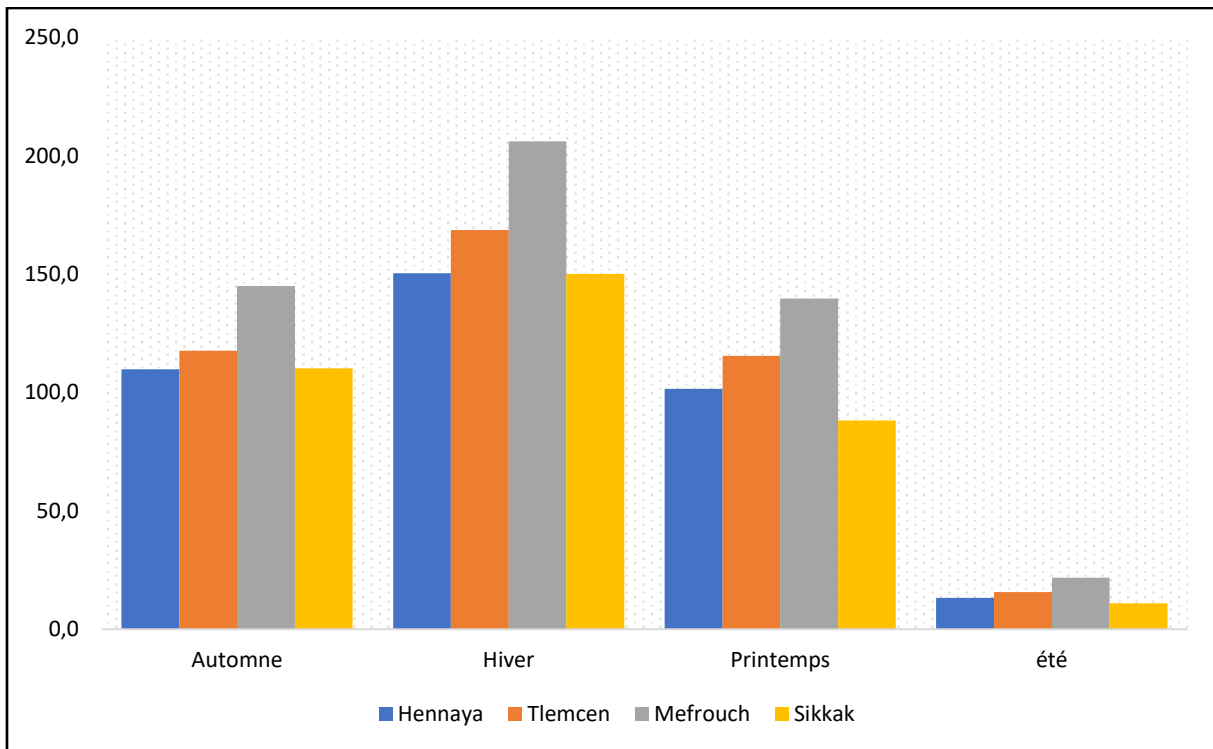


Figure II-5: Histogramme des précipitations saisonnières des stations

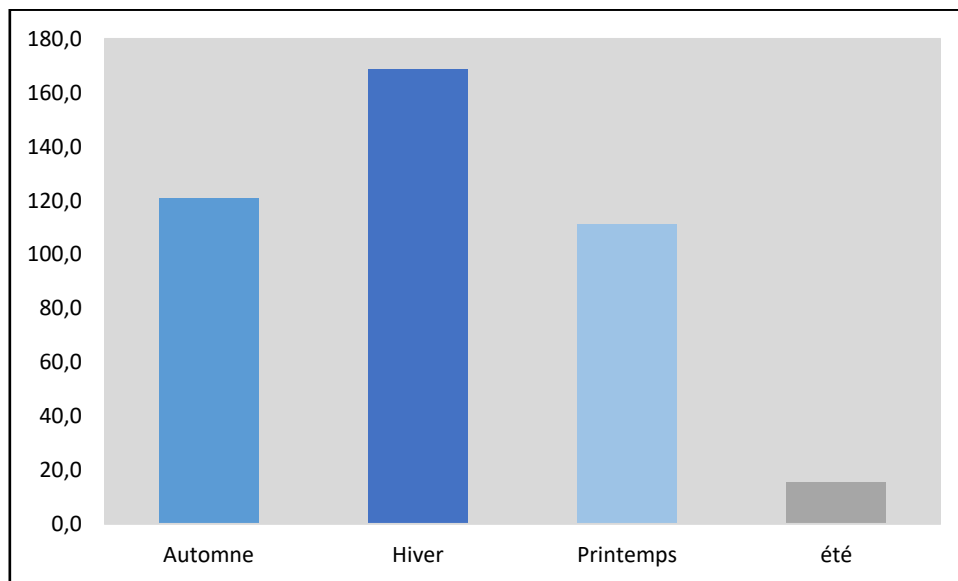


Figure II-6: Distribution des précipitations moyennes inter-saisonnières des quatre stations

II.2.5 Etude statistique des précipitations annuelles

Pour mieux comprendre la variabilité annuelle des précipitations, qui influent directement sur le débit des cours d'eau, et afin de décrire le schéma des précipitations sur une base annuelle, nous chercherons à déterminer une loi de probabilité qui puisse ajuster la répartition des précipitations annuelles. Ainsi notre objectif est d'identifier les paramètres de cette loi d'ajustement et de calculer des valeurs normalisées.

Cette analyse statistique des données de précipitations permettra de définir les caractéristiques du régime pluviométrique dans notre zone d'étude et nous aidera également à estimer les précipitations pour des périodes spécifiques de retour.

Les valeurs des précipitations annuelles sont répertoriées en annexe sur le (voir tableau annexe 1) par ordre croissant pour les stations considérées.

La fréquence de chaque valeur est déterminée par le rapport suivant :

$$F_i = \frac{i-0,5}{N} \quad \text{Eq.2 1}$$

Où i : rang

N : Nombres d'années

Tableau II-6: paramètres de position des précipitations

Paramètres	Formules
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_1^N P_i$
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (P_i - \bar{P})^2$
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$
Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$

Tableau II-7: Paramètres statistiques des séries pluviométriques aux différentes stations

Station	Moyenne	Variance	Ecart type	Cv
Sikkak	359,6	6249,8	79,05	0,22
Hennaya	375,1	7007,39	83,71	0,22
Tlemcen	417,5	8533,22	92,37	0,22
Mefrouche	512,6	12768,34	113,00	0,22

On constate que le coefficient de variation $C_v < 0,3$ pour toutes les stations étudiées, cela suggère que l'ajustement suit une loi normale.

II.2.5.1 Ajustement par la loi normale

L'équation de la droite d'Henry est donnée par :

$$P = \bar{P} + \sigma_U \quad \text{Eq.2 2}$$

L'examen graphique des données pluviométriques des diverses stations étudiées (figure II-7) révèle une tendance générale à suivre une distribution normale de Gauss. De plus, nous avons effectué des calculs pour estimer les précipitations relatives à des événements récurrents (pour les périodes de retour de 10 ans, 100 ans et 1000 ans) pour estimer la variabilité de la pluviométrie des années à venir (Tableau II-9).

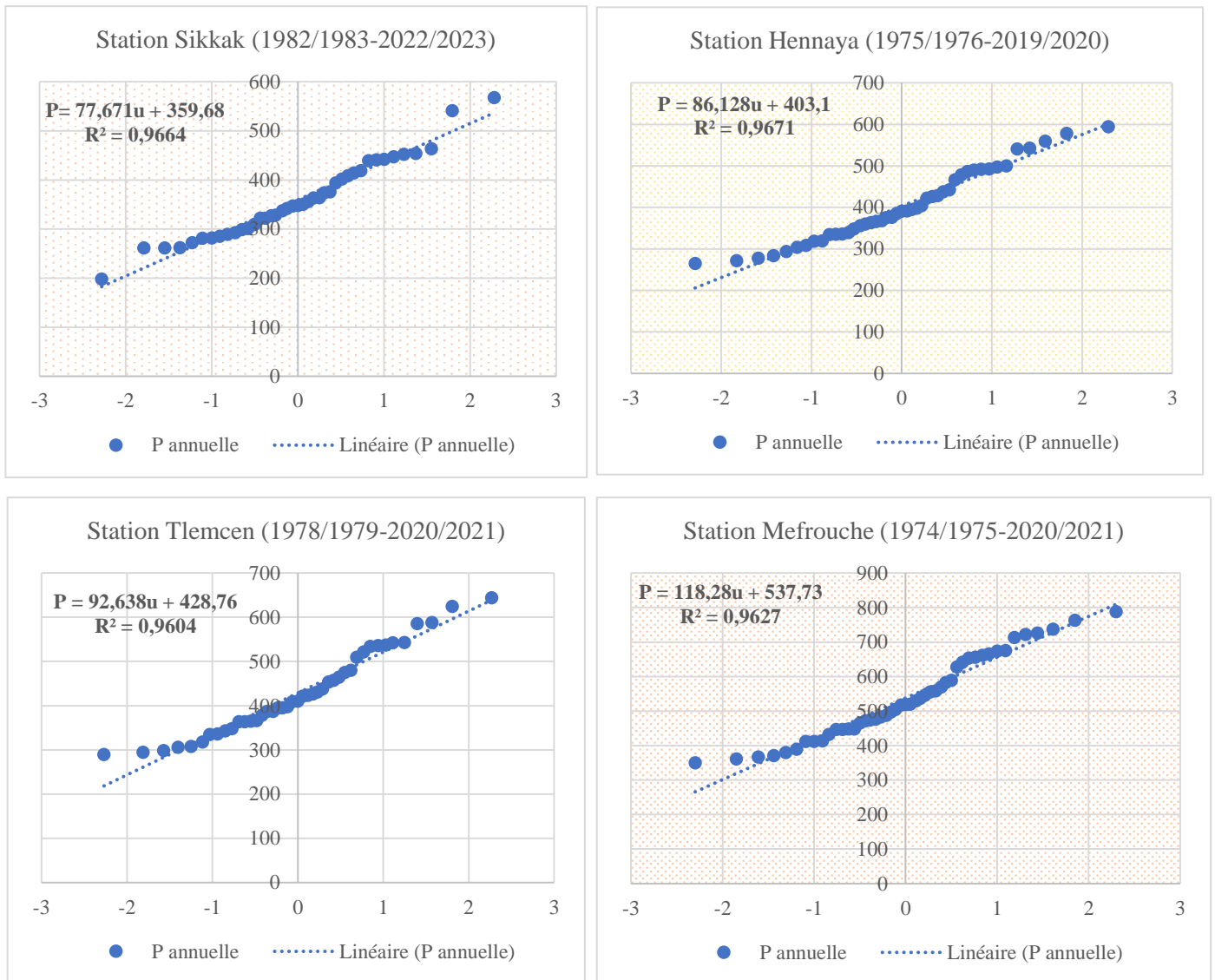


Figure II-7: Ajustement des précipitations à la loi de Gauss pour les différentes stations.

Les résultats d'étude statistique des précipitations annuelles sont portés sur le tableau suivant :

Tableau II-8: Ajustement des précipitations annuelles des stations.

Stations	Périodes	Equation
Sikkak	1982/1983-2022/2023	$P = 77,671u + 359,68$
Hennaya	1975/1976-2019/2020	$P = 86,128 u + 403,1$
Tlemcen	1978/1979-2020/2021	$P = 92,638 u + 428,76$
Mefrouche	1974/1975-2020/2021	$P = 118,28 u + 537,73$

Tableau II-9: Calcul des précipitations pour les périodes de récurrence des années humides.

Stations	Pluie moyenne (mm)	Pluie décennale (mm)	Pluie centennale (mm)	Pluie millénaire (mm)
Sikkak (1982-2023)	359,68	459,1	540,65	600
Hennaya (1975-2020)	403,1	513,34	603,78	669,23
Tlemcen (1978-2021)	428,76	547,33	644,60	715
Mefrouche (1974-2021)	537,73	689,13	813,32	903,21
Moyenne	432,32	552,22	650,6	721,9

Tableau II-10: Valeurs des précipitations pour les périodes de récurrence des années sèches

Stations	Pluie décennale (mm)	Pluie centennale (mm)	Pluie millénaire (mm)
Sikkak	260,26	178,7	119,68
Hennaya	292,85	202,42	136,96
Tlemcen	310,18	312,91	142,5
Mefrouche	386,31	262,13	172,24
Moyenne	312,4	239	142,8

II.3 Etude des températures

II.3.1 Introduction

La température, en conjonction avec d'autres variables météorologiques, joue un rôle essentiel dans la détermination du climat. Elle intervient dans le calcul du déficit d'écoulement et des indices climatiques, en interaction avec les précipitations. Les températures moyennes annuelles et mensuelles interagissent directement avec des facteurs météorologiques tels que l'insolation, la vitesse et la turbulence du vent, ainsi que les précipitations, ainsi que des facteurs biogéographiques, influençant l'évapotranspiration et les déficits d'écoulement annuels et saisonniers.

II.3.2 La température moyenne annuelle

Etudier la température moyenne annuelle permet de comprendre les tendances climatiques à long terme, d'évaluer l'impact du changement climatique surtout sur les ressources en eau.

Tableau II-11: Températures moyennes annuelles des différentes stations (1982/1983-2022/2023)

Années	T°C Sikkak	T°C Tlemcen	T°C Hennaya	T°C Mefrouche
1982/1983	18,0	15,3	17,0	13,7
1983/1984	18,5	15,8	17,5	14,2
1984/1985	18,4	15,7	17,4	14,1
1985/1986	18,5	15,8	17,4	14,2
1986/1987	18,5	15,8	17,5	14,2
1987/1988	19,0	16,3	18,0	14,7
1988/1989	18,8	16,0	17,7	14,4
1989/1990	19,5	16,8	18,4	15,2
1990/1991	18,3	15,6	17,3	14,0

1991/1992	17,9	15,2	16,9	13,6
1992/1993	18,2	15,4	17,1	13,8
1993/1994	18,6	15,9	17,5	14,3
1994/1995	18,8	16,1	17,7	14,4
1995/1996	18,8	16,1	17,7	14,4
1996/1997	18,5	15,8	17,5	14,2
1997/1998	19,1	16,4	18,0	14,8
1998/1999	18,5	15,8	17,5	14,2
1999/2000	18,9	16,2	17,9	14,6
2000/2001	19,2	16,5	18,2	14,9
2001/2002	18,6	15,9	17,6	14,3
2002/2003	19,3	16,6	18,2	15,0
2003/2004	18,8	16,0	17,7	14,4
2004/2005	18,5	15,7	17,4	14,1
2005/2006	18,8	16,1	17,8	14,5
2006/2007	19,0	16,3	18,0	14,7
2007/2008	18,8	16,1	17,8	14,5
2008/2009	18,6	15,9	17,6	14,3
2009/2010	19,4	16,7	18,4	15,1
2010/2011	19,1	16,4	18,1	14,8
2011/2012	18,7	16,0	17,7	14,4
2012/2013	18,5	15,8	17,5	14,2
2013/2014	19,0	16,2	17,9	14,6
2014/2015	19,6	16,9	18,6	15,3
2015/2016	19,5	16,8	18,5	15,2
2016/2017	19,9	17,2	18,8	15,6
2017/2018	18,7	16,0	17,7	14,4
2018/2019	19,0	16,4	18,1	14,8
2019/2020	19,7	17,1	18,7	15,5
2020/2021	19,7	17,3	18,9	15,7
2021/2022	19,4	16,9	18,5	15,3
2022/2023	20,8	18,1	19,8	16,5
Moyenne	18,9	16,2	17,9	14,6

La variation des températures moyennes annuelles (1982/83-2022/23) montre une irrégularité thermique d'une année à l'autre, bien que les valeurs restent proches. D'après le graphique (figure II-8), la zone la plus chaude est celle du barrage de Sikkak, car les plus hautes températures sont observées à la dite station avec une température moyenne de 19°C, tandis qu'à la station du Mefrouche, les températures moyennes sont plus basses, elles varient de 14,6 °C en raison de son altitude plus élevée. La moyenne interannuelle des quatre stations donne 17 °C, correspond à la température moyenne de notre bassin versant.

En observant la courbe de tendance, on constate que la température moyenne tend à augmenter, ce qui peut être attribué au réchauffement climatique. Cela pourrait avoir un impact négatif sur la gestion des ressources en eau, en particulier la gestion des barrages. La température élevée peut entraîner l'évaporation de la quantité d'eau stockée au barrage.

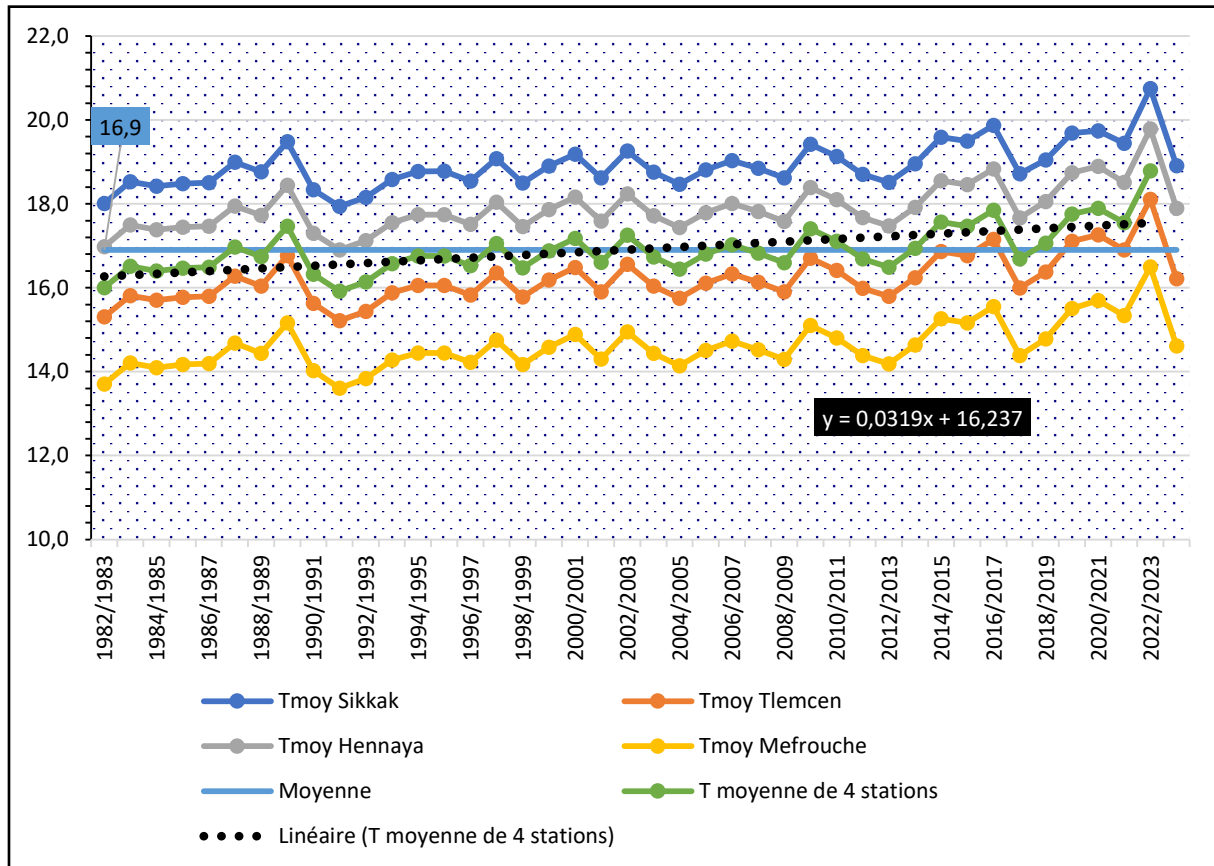


Figure II-8: Variation des températures annuelles des stations (1982/1983-2022/2023).

II.3.3 La température moyenne mensuelle

Il est aussi intéressant d'étudier la température moyenne mensuelle pour mieux cerner le climat et prévoir les variations saisonnières de la zone d'étude.

Tableau II-12: Les valeurs moyennes mensuelles des températures aux stations étudiées (1982/1983-2022/2023)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avl	Mai	Juin	juil	Aout
Sikkak	24,3	20,4	15,6	12,8	11,5	12,2	14,4	16,4	19,7	23,9	27,7	28,0
Hennaya	23,3	19,4	14,2	11,3	10,0	10,8	13,1	15,6	19,1	23,3	27,2	27,4
Tlemcen	21,6	17,8	12,4	9,3	8,1	9,1	11,5	14,3	17,8	21,8	25,3	25,6
Mefrouche	20,5	15,6	9,8	6,6	5,6	6,8	9,6	12,6	16,9	21,4	24,9	25,2
Moyenne	22,4	18,3	13,0	10,0	8,8	9,7	12,2	14,7	18,4	22,6	26,3	26,5

La variation des températures moyennes mensuelles mesurées aux différentes stations (figure II-9) met en évidence deux phases distinctes sur l'année.

La première phase, qui s'étend de septembre à janvier, est marquée par une diminution progressive et significative des températures. Au fur et à mesure que l'on s'approche de l'hiver, les températures chutent, atteignant leur niveau le plus bas en janvier. Cette période correspond

à la transition entre l'automne et l'hiver, avec des systèmes météorologiques favorisant un refroidissement des masses d'air, notamment en raison de la diminution de l'ensoleillement.

En revanche, à partir de février, une augmentation graduelle des températures est observée. Cette tendance à la hausse se poursuit jusqu'en août, où la température moyenne atteint son maximum annuel. Cette période correspond à la transition entre le printemps et l'été, où les températures deviennent plus élevées sous l'effet d'une plus forte radiation solaire et de conditions atmosphériques stables.

L'analyse détaillée des résultats (tableau II-12 et figure II-9) permet de dégager les points suivants :

La période la plus chaude, s'étendant de juin à septembre, est caractérisée par des températures élevées, avec un pic en août. Durant ce mois, la température moyenne atteint son apogée avec 26,5 °C, indiquant des conditions estivales marquées par une chaleur intense, typique des régions méditerranéennes. Ces températures maximales influencent fortement la demande en eau, notamment pour l'irrigation agricole et la consommation humaine.

La période la plus froide se situe entre décembre et février, avec janvier comme le mois le plus froid de l'année. La température moyenne pour ce mois descend à 8,8 °C, indiquant des conditions hivernales rigoureuses, notamment dans les zones d'altitude plus élevée. Ces températures plus basses limitent l'évaporation et influencent le cycle hydrologique en favorisant la recharge des nappes phréatiques.

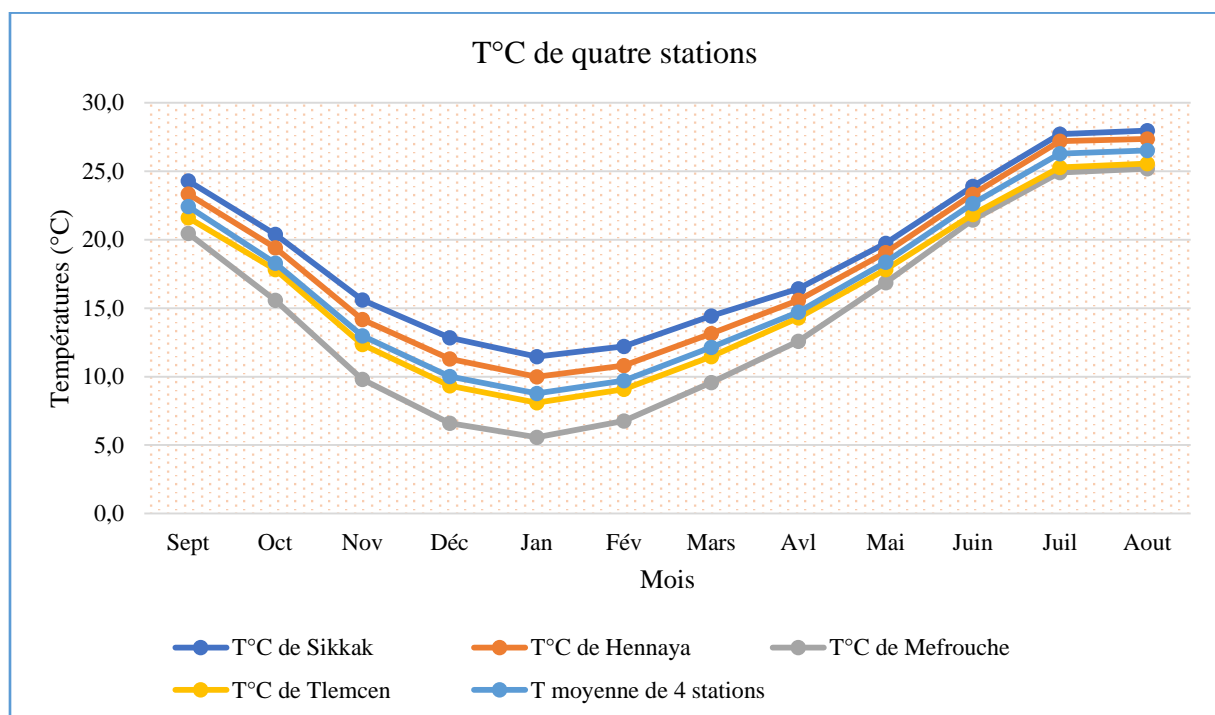


Figure II-9: Variation des températures moyennes mensuelles des différentes stations étudiées (1982/1983-2022/2023).

II.3.4 Température moyenne saisonnière

Les données de températures moyennes saisonnières sont portées le tableau suivant :

Tableau II-13: Variations des températures moyennes saisonnières aux stations

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	été
T°C (moyenne)	17,9	9,5	15,1	25,1

D'après l'analyse de tableau II-11 et figure II-10, nous constatons que :

Durant la période étudiée (1982/1983-2022/2023), l'hiver se distingue comme la saison la plus froide, avec une température moyenne est d'environ 10°C. Cette baisse des températures est essentiellement due aux conditions météorologiques de la région, où les vents froids et la faible durée d'ensoleillement permettent à une baisse marquée de la température. L'altitude du bassin et son éloignement de la mer augmentent également l'effet de fraîcheur, particulièrement dans les zones plus élevées du relief, où les températures peuvent être encore plus basses.

La température hivernale modérée, bien que relativement froide pour une région semi-aride, joue un rôle important dans l'alimentation des ressources en eau, car les faibles taux d'évaporation permettent une meilleure rétention de l'humidité dans les sols et conservent l'humidité, favorisant ainsi l'accumulation d'eau dans le bassin versant. Cela est particulièrement bénéfique pour le renouvellement des nappes phréatiques et l'alimentation des cours d'eau qui approvisionnent le barrage de Sikkak, assurant un apport en eau plus constant pendant cette période.

Par contre, l'été se démarque comme la saison la plus chaude de la région, avec une température moyenne de 25°C. Pendant cette période, la chaleur est intensifiée par les vents chauds et par l'absence de précipitations notables. L'exposition prolongée au soleil, combinée à la topographie du bassin, entraîne une augmentation significative des températures estivales. Ces températures élevées présentent une évaporation importante des ressources en eau, ce qui réduit les réserves d'eau dans le bassin versant. Ces températures élevées et l'évaporation qui en découle ont un effet direct sur le niveau d'eau du barrage de Sikkak. En l'absence de prélèvement pour alimenter le barrage et compenser les pertes, le niveau d'eau diminue, compromettant ainsi l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et la consommation domestique.

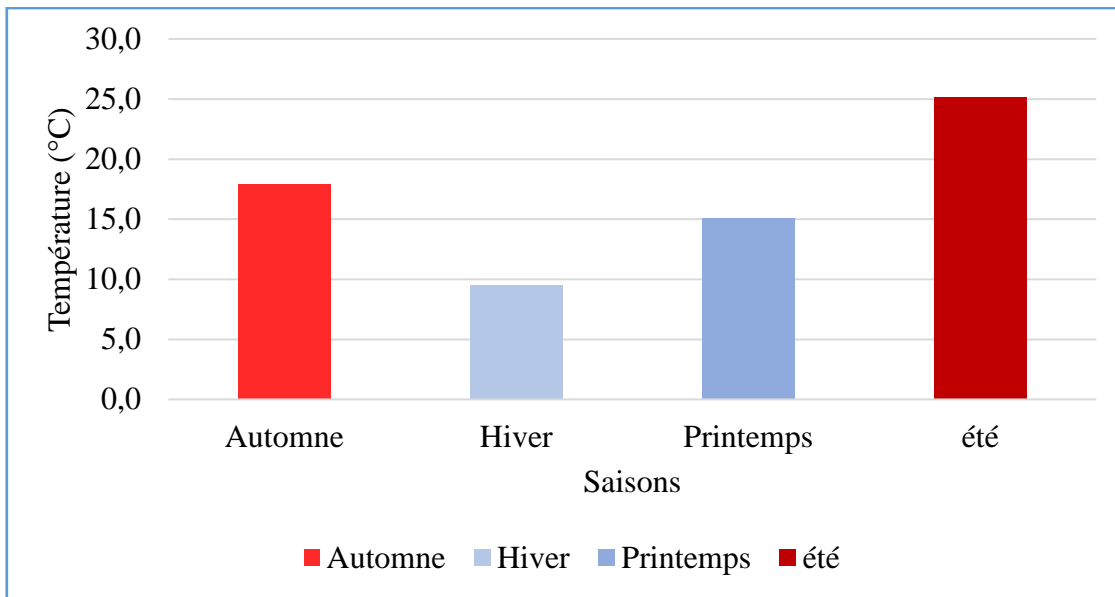


Figure II-10: Variation des températures moyennes saisonnières

II.4 Etude du climat

L'étude du climat par des indices climatiques est basée sur les données de températures et de précipitations moyennes mensuelles pour la période allant de 1982/1983 à 2022/2023 qui sont portés sur le tableau ci-dessous :

Tableau II-14: Précipitations et températures moyennes mensuelles (1982/1983-2022/2023)

Mois	P (mm)	T °C
Sept	21,7	22,4
Oct	34,9	18,3
Nov	64,1	13,0
Déc	55,8	10,0
Jan	62,1	8,8
Fév	50,9	9,7
Mars	44,6	12,2
Avl	36,5	14,7
Mai	30,2	18,4
Juin	9,6	22,6
Juil	2,3	26,3
Aout	3,6	26,5

La courbe pluvio-thermique moyenne du bassin de Sikkak (figure II-11) met clairement en évidence deux périodes climatiques bien distinctes au cours de l'année. D'une part, une période humide qui s'étend, de novembre à avril (soit 6 mois), où la courbe des précipitations se trouve au-dessus de celle des températures moyennes du BV. Cet excès d'humidité crée des conditions favorables à la croissance de la végétation et à l'alimentation des cours d'eau, contribuant ainsi à l'enrichissement en eau du bassin versant de l'oued Sikkak, ce qui peut améliorer l'apport en eau du barrage de Sikkak. Cette période coïncide avec les mois les plus froids, lorsque l'évaporation est faible, permettant une meilleure rétention d'eau dans les sols.

D'autre part, la courbe montre une seconde période, sèche et déficitaire, qui couvre également six mois, de mai à octobre. Durant cette période, les précipitations chutent drastiquement, tandis que les températures augmentent donnant une courbe au-dessus de celle des précipitations. Cette phase est marquée par un manque d'eau, ce qui limite l'humidité des sols et peut entraîner des conditions de sécheresse plus ou moins sévères, notamment durant les mois les plus chauds de l'été. Cette période de températures élevées et de faible pluviométrie provoque une évapotranspiration importante, impactant négativement l'apport en eau du bassin versant de l'oued Sikkak et le remplissage du barrage de Sikkak.

Ce découpage équilibré de l'année en deux périodes égales montre une alternance entre humidité et sécheresse, typique des climats méditerranéens, où les saisons sont marquées par une forte variation des précipitations et des températures.

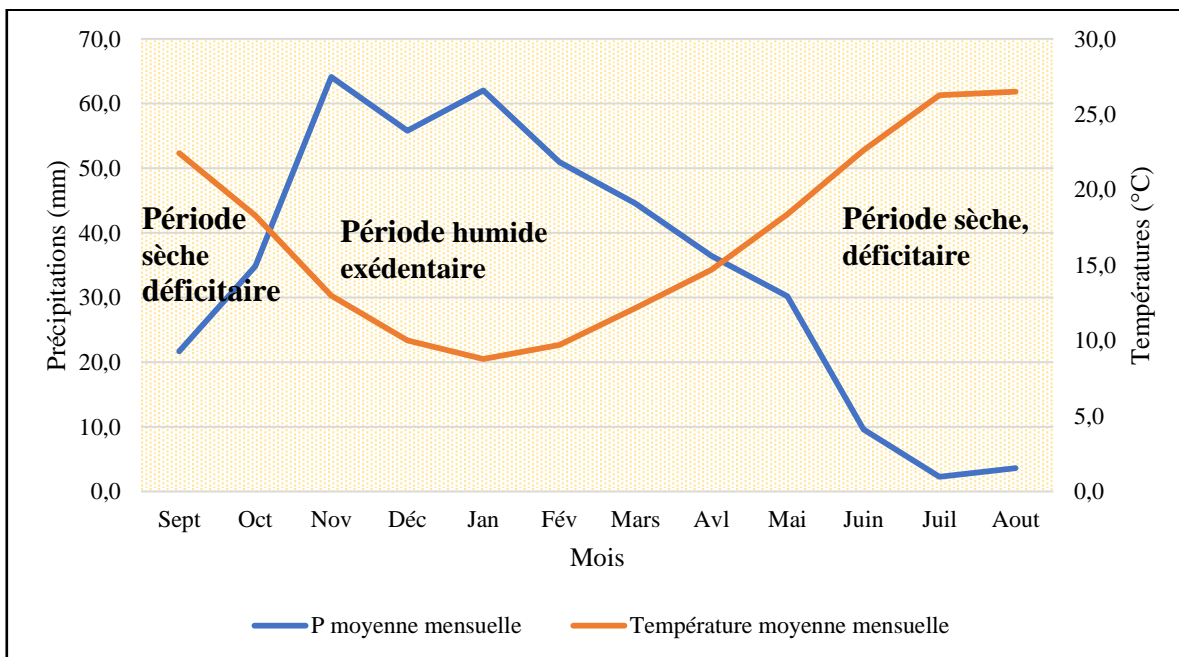


Figure II-11: Courbe pluvio-thermique moyenne du bassin du Sikkak (1982/1983-2022/2023)

II.4.1 Indice climatique : Indice d'aridité de De Martonne (1926)

Cet indice climatique, formulé en 1926 par le géographe De Martonne, sert à déterminer la classification climatique d'une région donnée.

II.4.1.1 Indice d'aridité annuel de De Martonne

L'indice d'aridité annuel de De Martonne est déterminé à l'aide la formule suivante :

$$I = \frac{P}{10+T} \quad \text{Eq.2 3}$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles déterminées aux différentes stations : 416 mm

T : Températures moyennes annuelles enregistrées aux différentes stations : 17°C

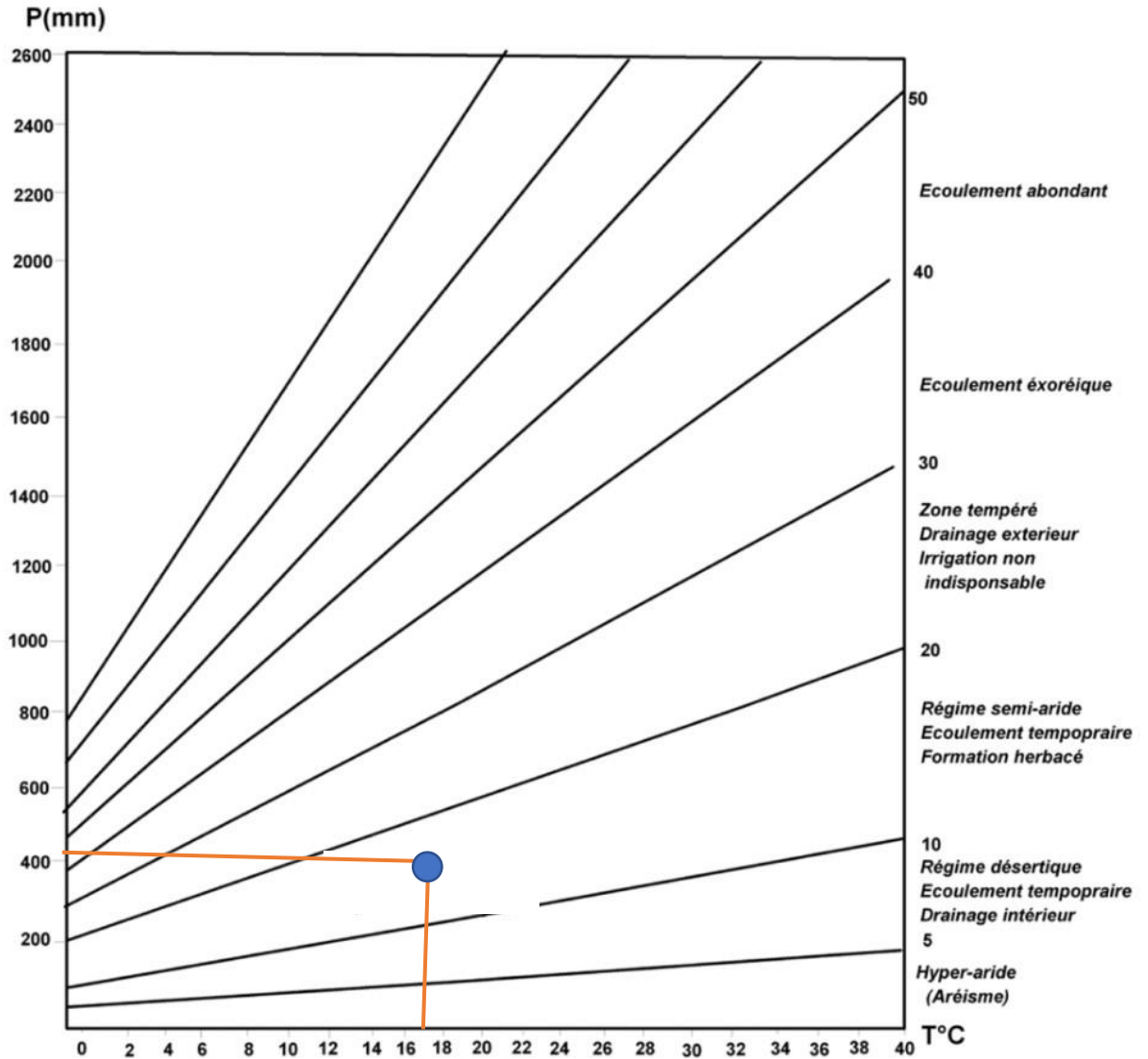


Figure II-12: Abaque de De Martonne

Tableau II-16: Classification du climat mensuel selon De Martonne aux différentes stations étudiées (1982/1983-2022-2023).

Mois	P (mm)	T °C	I	Type de climat
Sept	21,7	22,4	8,0	Désertique
Oct	34,9	18,3	14,8	Semi-aride
Nov	64,1	13,0	33,5	Tempéré
Déc	55,8	10,0	33,5	Tempéré
Jan	62,1	8,8	39,6	Tempéré
Fév	50,9	9,7	31,0	Tempéré
Mars	44,6	12,2	24,1	Tempéré
Avl	36,5	14,7	17,7	Semi-aride
Mai	30,2	18,4	12,8	Semi-aride
Juin	9,6	22,6	3,5	Hyperaride
Juil	2,3	26,3	0,8	Hyperaride
Aout	3,6	26,5	1,2	Hyperaride

Les résultats obtenus d'indices d'aridité du (tableau II-16) démontrent que le régime climatique mensuel varie de manière significative, allant de l'hyper aridité aux climats steppique, désertique, semi-aride et tempéré.

II.5 Etude d'évapotranspiration

II.5.1 Introduction

L'évapotranspiration, une composante essentielle du cycle hydrologique, correspond à la combinaison de l'évaporation directe provenant des sols humides et des plans d'eau, ainsi que de la transpiration des plantes. On distingue : l'évapotranspiration réelle (ETR) représente l'eau réellement perdue par celle-ci sous forme de vapeur et l'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité d'eau qui pourrait être perdue si l'eau n'était pas un facteur limitant. Dans cette étude nous intéressons sur l'ETP pour pouvoir par la suite faire la modélisation entre pluie-débit de Génie rural (GR1A et GR2M).

II.5.2 Evapotranspiration selon la méthode de TURC

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de **Penmann**, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'ensoleillement.

Cette formule s'écrit sous la forme suivante :

$$ETP = 0,4*(I_g+50)*k \frac{T}{T+15} \quad \text{Eq.2 5}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

T : température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

I_g : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour) ;

K : un coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50% ;

Tableau II-17: Valeurs moyennes annuelles de l'ETP par la méthode de Turc aux différentes stations (1982/1983-2022/2023)

Années	ETP TURC (mm)	Années	ETP TURC (mm)
1982/1983	932,28	2003/2004	949,39
1983/1984	939,82	2004/2005	938,37
1984/1985	940,84	2005/2006	953,26
1985/1986	941,16	2006/2007	957,62
1986/1987	945,60	2007/2008	954,64
1987/1988	956,74	2008/2009	946,17
1988/1989	948,95	2009/2010	969,13
1989/1990	969,73	2010/2011	962,09
1990/1991	933,72	2011/2012	943,51
1991/1992	927,89	2012/2013	943,26
1992/1993	934,32	2013/2014	957,70
1993/1994	947,69	2014/2015	970,60
1994/1995	953,20	2015/2016	971,03
1995/1996	951,69	2016/2017	979,98

1996/1997	950,03	2017/2018	947,61
1997/1998	959,04	2018/2019	958,83
1998/1999	944,13	2019/2020	978,44
1999/2000	955,16	2020/2021	982,63
2000/2001	964,75	2021/2022	971,74
2001/2002	947,72	2022/2023	1000,84
2002/2003	963,11		

II.5.3 Evapotranspiration selon la méthode de Thornthwaite

La formule de **Thornthwaite** est basée sur les températures moyennes mensuelles de l'air. Elle est donnée par la relation suivante :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 * \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a . K \quad \text{Eq.2 6}$$

Avec :

T : température moyenne mensuelle de l'air (°C)

I : indice thermique annuel qui est égal à la somme des indices mensuels calculés à partir des températures moyennes mensuelles selon la formule suivante :

$$I = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad \text{Eq.2 7}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49 \quad \text{Eq.2 8}$$

K : Coefficient de correction dépendant de latitude d'une région donnée.

Tableau II-18: Valeurs moyennes annuelles de l'ETP par la méthode de Thornthwaite aux différentes stations (1982/1983-2022/2023)

Années	ETP THORN (mm)	Années	ETP THORN (mm)
1982/1983	828,46	2003/2004	870,16
1983/1984	849,61	2004/2005	883,33
1984/1985	846,10	2005/2006	886,37
1985/1986	853,61	2006/2007	872,90
1986/1987	851,49	2007/2008	876,81
1987/1988	874,25	2008/2009	885,55
1988/1989	878,54	2009/2010	885,02
1989/1990	895,78	2010/2011	897,54
1990/1991	861,09	2011/2012	896,50
1991/1992	820,99	2012/2013	848,74
1992/1993	834,98	2013/2014	879,14
1993/1994	866,70	2014/2015	931,25
1994/1995	858,56	2015/2016	899,63
1995/1996	847,11	2016/2017	944,04
1996/1997	836,61	2017/2018	868,13
1997/1998	873,37	2018/2019	896,41

1998/1999	867,49	2019/2020	934,01
1999/2000	886,02	2020/2021	926,06
2000/2001	883,82	2021/2022	936,43
2001/2002	856,35	2022/2023	994,48
2002/2003	908,05	2003/2004	

D'après les courbes (figure II-13), on constate que les valeurs moyennes annuelles de l'ETP calculées par méthode de **TURC** sont légèrement supérieures à celles de l'ETP de **Thorntwaite** avec des moyennes interannuelles respectives de 954,74 mm et 880,28 mm.

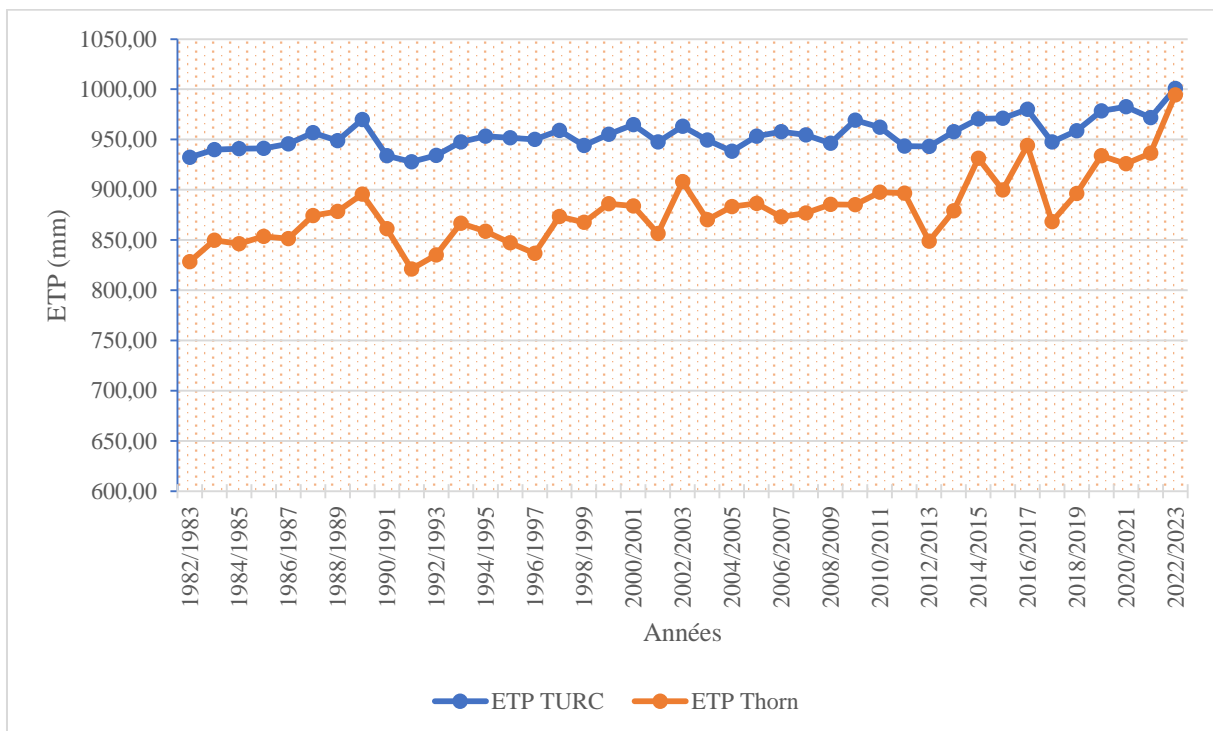


Figure II-13: Variation moyenne annuelle de l'ETP Turc et l'ETP Thornthwaite pour les différentes stations de notre bassin versant.

II.6 Etude hydrologique

L'étude hydrologique du bassin versant concerne l'analyse des caractéristiques hydrologiques d'une zone géographique donnée, afin de comprendre la manière dont l'eau s'écoule à travers le paysage, de la pluie tombant sur les sols jusqu'aux cours d'eau, en passant par les processus d'infiltration et d'écoulement de surface.

II.6.1 Apports annuels du bassin versant de l'oued Sikkak

Nous utilisons les données des apports annuels enregistrés à la station du barrage de Sikkak correspondant à la période de 1982/1983-2022/2023.

Tableau II-19: Apports annuels de Sikkak (1982/1983-2022/2023)

Années	Apport annuel Hm ³	Années	Apport annuel Hm ³
1982/1983	9,071	2003/2004	12,325
1983/1984	4,802	2004/2005	6,452
1984/1985	5,538	2005/2006	5,973
1985/1986	14,253	2006/2007	4,737
1986/1987	21,823	2007/2008	4,245
1987/1988	10,310	2008/2009	25,979
1988/1989	4,156	2009/2010	10,085
1989/1990	6,288	2010/2011	10,525
1990/1991	5,507	2011/2012	10,028
1991/1992	2,661	2012/2013	36,923
1992/1993	13,795	2013/2014	32,749
1993/1994	7,774	2014/2015	31,804
1994/1995	8,037	2015/2016	21,038
1995/1996	6,330	2016/2017	19,130
1996/1997	11,471	2017/2018	23,209
1997/1998	15,149	2018/2019	20,773
1998/1999	11,668	2019/2020	23,801
1999/2000	4,106	2020/2021	16,656
2000/2001	6,135	2021/2022	18,909
2001/2002	20,713	2022/2023	12,016
2002/2003	16,089		

La distribution des apports en eau annuels, telle que présentée dans la figure II-14, révèle une grande variabilité au fil des années, caractéristique d'un régime hydrologique fortement influencé par la variabilité climatique. Certains événements de crue marquants ressortent, comme en 1987, 2002, 2009, ainsi que durant la période 2013-2022. Ces années ont enregistré des apports hydrologiques dépassant largement la moyenne interannuelle de 13 Hm³, indiquant des excédents d'écoulement significatifs.

Périodes de forts apports :

Année 2009 : Cette année est particulièrement notable, car elle marque un événement exceptionnel qui a permis au barrage de Sikkak d'atteindre son premier remplissage complet depuis sa mise en service en 2004/2005. Cet apport en eau massif est directement lié à des précipitations intenses, qui ont alimenté les cours d'eau et accru l'écoulement vers le barrage.

Années 2013-2022 : Ces années montrent également des apports hydrologiques importants, dépassant la moyenne interannuelle, ce qui suggère des périodes de précipitations abondantes, favorisant un écoulement supérieur.

Périodes de déficit hydrologique :

En revanche, certaines années, notamment 1984, 1988-1992, 1994, ainsi que la période 2005-2008, enregistrent des apports nettement inférieurs à la moyenne interannuelle. Ces déficits sont

probablement liés à des sécheresses et des précipitations insuffisantes, affectant directement le niveau des écoulements alimentant le barrage de Sikkak.

Ces observations mettent en lumière la variabilité naturelle des apports hydrologiques d'une année à l'autre, reflétant la complexité du régime climatique dans la région du barrage de Sikkak. Les années de surplus hydrologique sont essentielles pour compenser les périodes de déficit et garantir une gestion optimale des réserves en eau. Cependant, la tendance à la baisse observée après 2012/2013 nécessite une attention particulière, car elle pourrait signaler des périodes plus fréquentes de sécheresse et une réduction des ressources en eau à l'avenir. Une gestion proactive des ressources hydriques est donc impérative pour faire face à ces changements.

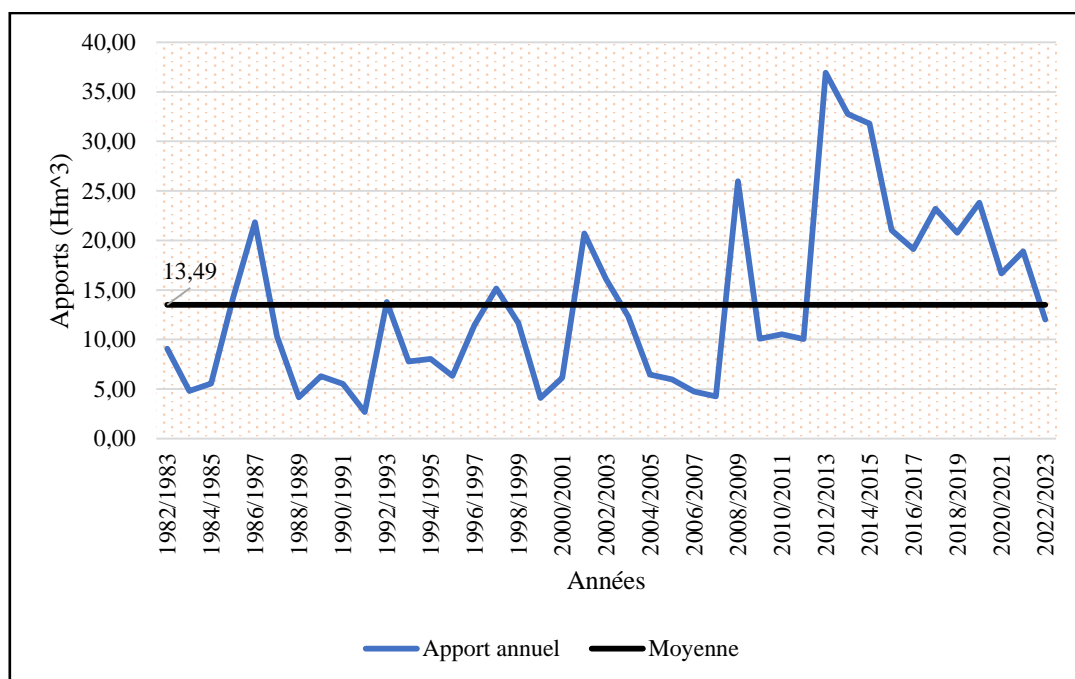


Figure II-14: Variation des apports annuels de l'Oued Sikkak.

II.6.2 La variabilité du coefficient d'écoulement

Pour mieux connaître les précipitations qui sont transformées en écoulement pour un bassin versant ou un cours d'eau, il est nécessaire de déterminer le coefficient d'écoulement. Ce coefficient se calcule par le rapport du débit ou du volume d'eau écoulé sur la précipitation. Il est donné par la relation suivante :

$$C_e = \frac{Q}{P} * 100 \quad \text{Eq.2 9}$$

Où Q : débit annuel (mm) et P : précipitations annuelles (mm)

Tableau II-20: Coefficients d'écoulement annuel

Années	Ce (%)	Années	Ce (%)
1982/1983	13,46	2003/2004	84,98
1983/1984	6,50	2004/2005	7,90
1984/1985	7,17	2005/2006	6,81
1985/1986	13,38	2006/2007	5,71
1986/1987	20,51	2007/2008	5,23
1987/1988	12,68	2008/2009	18,39
1988/1989	5,18	2009/2010	8,57
1989/1990	6,94	2010/2011	11,65
1990/1991	4,78	2011/2012	11,15
1991/1992	2,23	2012/2013	26,69
1992/1993	18,20	2013/2014	35,18
1993/1994	9,51	2014/2015	28,82
1994/1995	9,98	2015/2016	29,42
1995/1996	5,35	2016/2017	20,48
1996/1997	16,89	2017/2018	20,19
1997/1998	17,30	2018/2019	24,39
1998/1999	17,71	2019/2020	27,24
1999/2000	5,77	2020/2021	25,97
2000/2001	6,02	2021/2022	25,85
2001/2002	20,35	2022/2023	22,33
2002/2003	104,01		

La figure II-15 illustre l'évolution du coefficient d'écoulement annuel sur la période 1982/1983 à 2022/2023. Ce coefficient, qui représente le rapport entre le volume d'eau écoulé et les précipitations totales, montre des variations notables d'une année à l'autre, reflétant la variabilité hydrologique de la région. En général, on observe que le coefficient d'écoulement oscille principalement entre 10 % et 20 %, ce qui indique qu'une proportion relativement faible des précipitations se transforme en écoulement. Cette faible proportion peut être attribuée à différents facteurs, notamment l'évaporation, l'infiltration, et les caractéristiques des sols qui limitent le ruissellement.

Un événement particulièrement remarquable est observé en 2002/2003, où le coefficient d'écoulement dépasse les 100 %. Cela signifie que presque toutes les précipitations ont été converties en écoulement, ce qui suggère un événement hydrologique extrême, probablement une crue majeure. Ou que des lâchées d'eau à partir du barrage du Mefrouche ont été vraisemblablement provoquées pour éviter sa submersion. Cette situation exceptionnelle a permis un apport important en eau, favorisant ainsi le remplissage à 100% du barrage de Sikkak et un débordement au niveau de l'évacuateur de crue. Ce type d'événement survient souvent en présence de précipitations très abondantes, combinées à un sol déjà saturé, ce qui réduit l'infiltration et accentue le ruissellement de surface.

Après ce pic exceptionnel de 2002/2003, on constate une chute drastique du coefficient d'écoulement, notamment au cours de la période 2005-2008, marquée par un faible écoulement, probablement en raison de précipitations insuffisantes ou de sécheresse. À partir de 2009, une légère progression est observée, avec une stabilisation autour de 15 % à 30 % jusqu'à la fin de

la période étudiée. Cette stabilisation reflète une transformation modérée des précipitations en écoulement, indiquant que la région a retrouvé un régime hydrologique plus équilibré après une période de faible apport en eau.

Ainsi, l'évolution du coefficient d'écoulement au cours de la période 1982/1983 à 2022/2023 montre une grande variabilité, influencée par des événements hydrologiques extrêmes tels que les crues et les sécheresses. Le pic de 2002/2003, caractérisé par une forte transformation des précipitations en écoulement, constitue un événement rare et bénéfique pour le remplissage du barrage. En revanche, les années suivantes montrent une tendance à la baisse, suivie d'une stabilisation modérée. Ces résultats mettent en évidence l'importance des événements pluvieux intenses pour assurer un bon niveau d'écoulement et le maintien des réserves en eau dans la région.

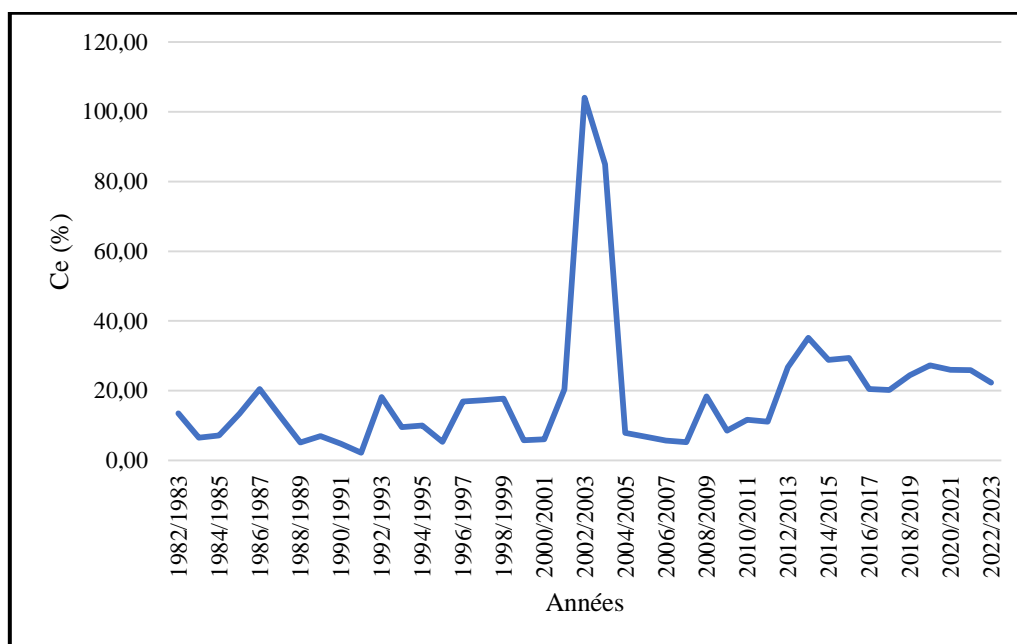


Figure II-15: L'évolution du coefficient d'écoulement annuel (1982/1983-2022/2023).

II.6.3 Etude statistique des apports annuels de l'Oued Sikkak

Afin de mieux comprendre la variabilité annuelle des apports du bassin versant de l'Oued Sikkak, il est essentiel de réaliser une étude statistique approfondie. Cette analyse nous permettrait d'ajuster les données des apports annuels et de calculer les valeurs normalisées. Une telle approche est cruciale pour évaluer les apports en eau sur la base de récurrences spécifiques, c'est-à-dire pour estimer les apports potentiels sur des périodes de retour de différentes fréquences (comme 10 ans, 50 ans, ou 100 ans).

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'utiliser la loi statistique de Galton, également connue sous le nom de loi log-normale. Cette loi est particulièrement adaptée pour modéliser les phénomènes hydrologiques, tels que les apports d'eau, qui présentent souvent une distribution asymétrique avec des valeurs extrêmes significatives. La loi log-normale permet de

mieux appréhender la variabilité des apports annuels, en tenant compte des fluctuations importantes observées d'une année à l'autre.

Grâce à cette méthode, il sera possible d'estimer les apports annuels pour différentes périodes de récurrence, ce qui est essentiel pour la gestion et la planification des ressources en eau dans la région. L'application de la loi de Galton contribuera également à prévoir les événements hydrologiques rares, tels que les années particulièrement humides ou sèches, afin de mieux anticiper les variations dans l'apport d'eau au barrage de Sikkak et aux autres infrastructures hydrauliques du bassin versant.

Les valeurs des apports annuels sont répertoriées en annexe (voir annexe 2) par ordre croissant.

Tableau II-21: Les caractéristiques de la série hydrométrique transformée en logarithme de Sikkak (1982/1983-2022/2023)

Station	Moyenne ($\overline{\text{LnAP}_{an}}$)	Ecart type ($\sigma_{\text{LnAP},an}$)	Coefficient de variation (Cv)
Sikkak	2,50	0,81	0,32

II.6.3.1 Ajustement par la loi log normale

Test graphique

On reporte les données sur papier fonctionnel Gausso-arithmétique permettant de représenter la fonction $\text{Ln}(\text{AP}_{an})=f(F_i)$. Le graphe comporte sur l'axe des abscisses les fréquences en échelle gaussienne et sur l'axe des ordonnées en échelle arithmétique la variable statistique (les apports annuels).

Ainsi l'équation de la droite de Galton est donnée par la relation suivante :

$$\text{LnAP}_{an} = \overline{\text{LnAP}_{an}} + \sigma_{\text{LnAP},an} * u. \quad \text{Eq.2 10}$$

Avec :

σ : Écart type des apports

LnAP_{an} : Apports annuels logarithmiques

$\overline{\text{LnAP}_{an}}$: Moyenne des apports logarithmiques.

D'après la (figure), l'ajustement graphique des séries hydrométriques prouve que l'apport annuel s'ajuste suivant la loi log normale.

En observant les valeurs du tableau II-22, on peut dire que la variabilité future montre une tendance à l'augmentation des apports pour des périodes de retour plus longues (100 ans et 1000 ans), ce qui pourrait indiquer une intensification des événements extrêmes comme les précipitations ou les inondations.

Ces tendances sont importantes pour la planification et la gestion des risques hydrologiques, en particulier dans le contexte du changement climatique.

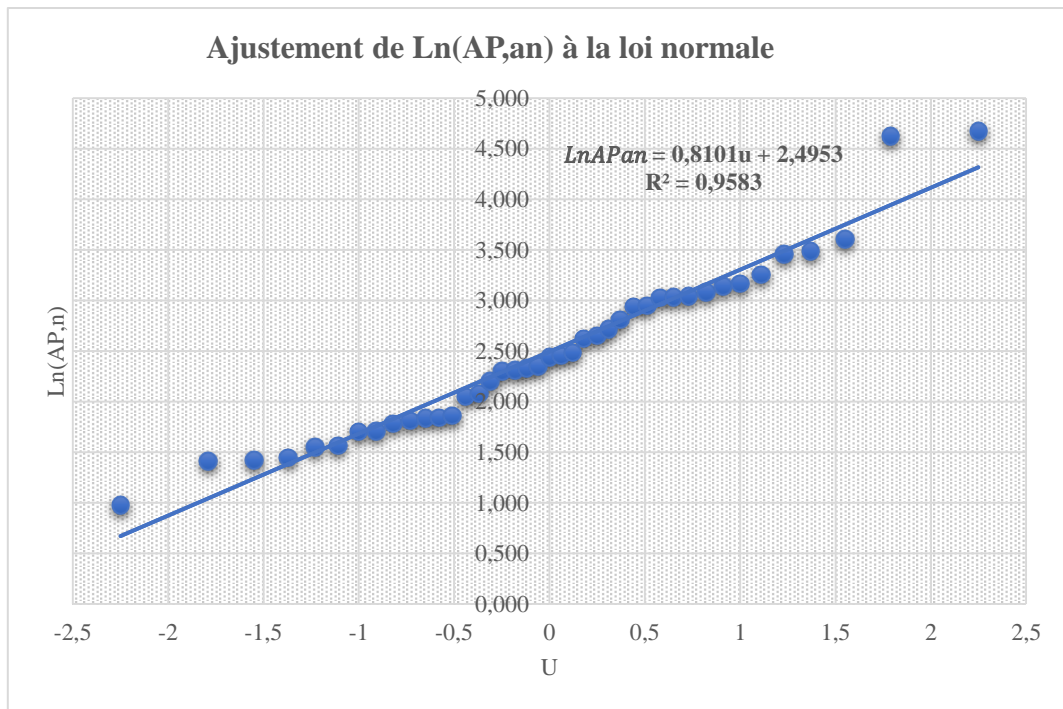


Figure II-16: Droite d'ajustement des apports annuels à la loi log normale.

Remplaçons la variable réduite (u) par sa valeur dans les équations suivantes :

$$LnAP_{an} = 2,4953 + 0,8101 * u.$$

Pour F1= 0,5 ; u= 0

Pour F2= 0,9 ; u= 1,28

Pour F3= 0,98 ; u= 2

Alors on aura :

Tableau II-22: Fréquences pour l'ajustement de la droite de Galton

F1= 0,5 (u= 0)	$LnAP_{an} = 2,495$
F2= 0,9 (u= 1,28)	$LnAP_{an} = 3,532$
F3= 0,98 (u= 2)	$LnAP_{an} = 4,115$
F4= 0,99 (u= 2,33)	$LnAP_{an} = 4,38$
F5= 0,999 (u= 3,1)	$LnAP_{an} = 5$

Tableau II-23: Calculs des apports pour les périodes de retour : décennale, centennale et millénaire

Période de retour	10 ans	100 ans	1000 ans
u	1,28	2,33	3,1
$LnAP_{an}$	3,53	4,38	5,00
AP (Hm ³)	34	80	148

II.6.4 Apports moyens mensuels de l'Oued Sikkak

Tableau II-24: Apports mensuels (Hm³) de Sikkak (1982/83-2022/023)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avl	Mai	Juin	Juil	Aout
Apports	0,38	0,72	1,19	1,61	2,10	2,27	2,05	1,64	1,02	0,44	0,21	0,16

L'histogramme (figure II-17) illustre la répartition mensuelle des apports en eau à la station du barrage de Sikkak, révélant une forte variabilité saisonnière. Les apports en eau atteignent leur maximum entre décembre et avril, avec un pic notable en février, où ils s'élèvent à environ 2,3 Hm³. Cette période correspond à la saison la plus humide, en accord avec les caractéristiques climatiques de la région, marquées par des précipitations abondantes en hiver.

En revanche, les mois d'été, de juin à août, enregistrent des apports très faibles, voire quasi nuls, ce qui souligne une saison sèche marquée. Cette baisse significative des apports durant l'été s'explique par la rareté des précipitations et l'évaporation intense typique des climats semi-arides méditerranéens, où les étés sont chauds et secs.

La transition entre la saison sèche et la saison humide commence à se manifester dès septembre, période à partir de laquelle on observe une augmentation progressive des apports. Cette tendance se poursuit jusqu'à atteindre son point culminant en février, puis une diminution graduelle s'opère à partir de mars jusqu'au mois d'août. Ce schéma de variation saisonnière des apports est directement lié aux cycles climatiques régionaux, influençant la gestion des ressources en eau, notamment pour le barrage de Sikkak, qui dépend de ces apports pour maintenir son niveau de stockage optimal tout au long de l'année.

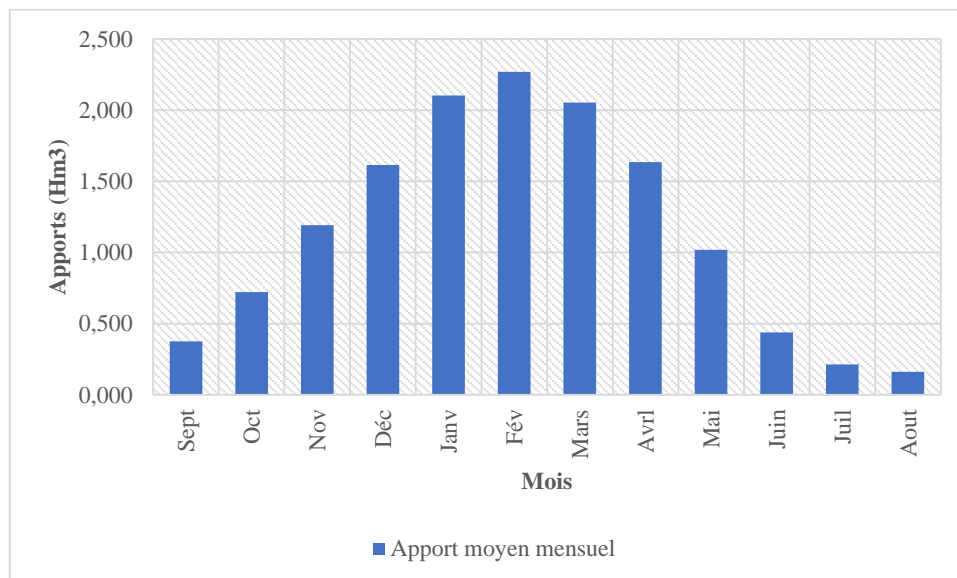


Figure II-17: Histogramme des apports mensuels à la station de Sikkak

II.6.4.1 Apports moyens saisonniers de Sikkak

Tableau II-25: Apports saisonniers à la station du barrage de Sikkak (1982/1983-2022/2023).

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	été
Apports	2,29	5,98	4,71	0,81

La saison hivernale enregistre l'apport moyen maximal de 6 Mm³ suivi de printemps 4,7 Mm³, alors que le plus faible a été enregistré en été avec 0,8 Mm³.

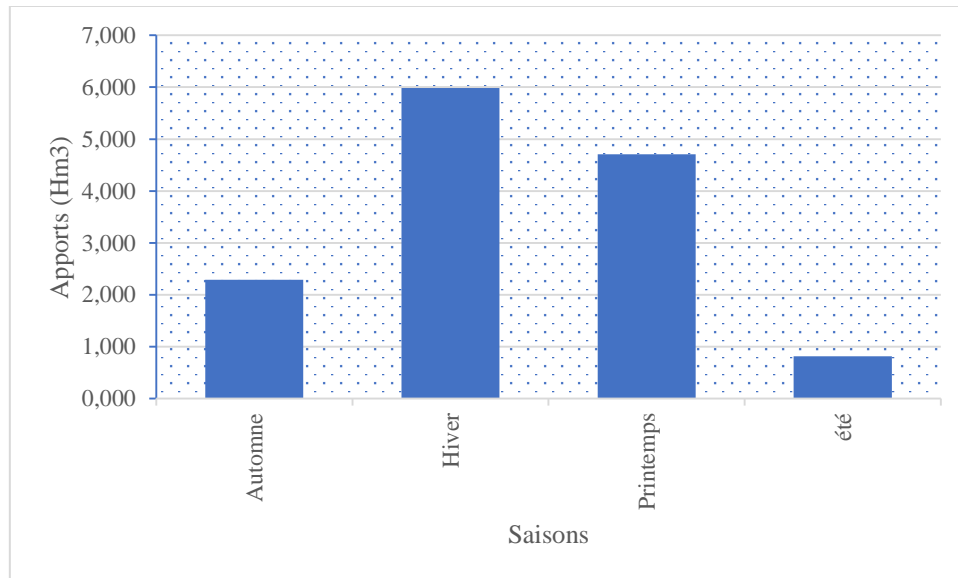


Figure II-18: Histogramme des apports moyens saisonniers à la station du barrage de Sikkak

II.7 Conclusion

L'étude des caractéristiques climatiques et hydrologiques de notre zone d'étude, centrée sur le bassin versant de l'Oued Sikkak, permet de tirer plusieurs conclusions significatives.

En premier lieu, la région se distingue par un climat méditerranéen typique, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et humides. La température moyenne annuelle y est d'environ 17°C, soulignant l'importance des variations saisonnières. Les données recueillies sur une période de 41 ans (1982/1983-2022/2023) montrent une pluviométrie moyenne annuelle de 416 mm, enregistrée à travers différentes stations météorologiques.

L'analyse des températures pour cette même période révèle que l'hiver est la saison la plus froide avec une température moyenne de 10°C, tandis que l'été est la plus chaude, avec une température moyenne atteignant 25°C. Cette variabilité thermique joue un rôle crucial dans les processus d'évaporation et d'infiltration, affectant directement les apports en eau dans le bassin.

Concernant la répartition des précipitations, l'hiver apparaît comme la saison la plus arrosée, avec des mois de novembre et janvier particulièrement pluvieux, enregistrant respectivement 64 mm et 62 mm de précipitations moyennes mensuelles. En revanche, les mois d'été, notamment juillet, se caractérisent par une sécheresse marquée, avec des précipitations minimales, ne dépassant pas 2,3 mm en moyenne.

L'indice d'aridité annuel confirme que notre zone d'étude se situe dans un climat semi-aride, ce qui implique des défis pour la gestion des ressources en eau, notamment face à des périodes prolongées de sécheresse.

Enfin, l'analyse des apports hydrologiques montre qu'un apport moyen annuel de 13,5 Hm³ a été enregistré à la station du barrage de Sikkak sur la période étudiée. Ces apports sont principalement concentrés durant les mois de décembre, janvier, mars et avril, périodes correspondant aux pics de précipitations et aux conditions favorisant un écoulement important vers le barrage. Cette distribution des apports mensuels souligne l'importance de l'hiver pour le remplissage des réservoirs et la gestion des ressources en eau dans la région.

Ces résultats permettent de mieux comprendre la dynamique hydrologique du bassin et soulignent l'importance de prendre en compte les variations saisonnières dans la gestion durable des ressources en eau, notamment dans un contexte de changements climatiques potentiels.

Chapitre III - Etude de la relation entre les précipitations et les apports au bassin versant de l'Oued Sikkak

Introduction

L'étude de la relation pluie-apport d'un bassin versant est essentielle pour une gestion durable des ressources en eau dans un bassin versant afin de comprendre la variabilité climatique future, la prévision des crues en analysant les précipitations et leur impact sur l'apport en eau, et la gestion des bassins versants.

Les principaux objectifs sont les suivants :

- Voir la corrélation entre les précipitations et débits afin de comprendre l'impact des précipitations sur l'apport en eau du bassin versant.
- Simuler et prévoir les débits à partir des précipitations pour connaître la variabilité future.

Dans ce chapitre, notre attention se porte principalement sur l'effet des précipitations sur l'apport en eau de l'Oued Sikkak, dans le but de comprendre l'impact de la variabilité pluviométrique sur le remplissage du barrage de Sikkak. Pour mener à bien cette analyse, nous utiliserons les données pluviométriques collectées aux différentes stations pluviométriques notamment la station du barrage de Sikkak, Mefrouche, Tlemcen et Hennaya afin de les corrélérer avec les apports en eau enregistrés à la station d'Aïn Youcef au barrage de Sikkak, pour pouvoir connaître la variabilité entre ces deux phénomènes (pluie et apport).

III.1 Variations annuelles de la pluie et de l'apport de Sikkak

Les données des précipitations moyennes annuelles des 4 stations (Sikkak, Hennaya, Tlemcen et Mefrouche) et des apports annuels mesurés à la station de Sikkak sont reportées dans le tableau III-1.

Tableau III-1: Précipitations moyennes annuelles pour les différentes stations et les apports annuels au barrage Sikkak (1982/1983-2022/2023).

Années	P moy an (mm)	Apport an (Hm ³)
1982/1983	302,6	9,07
1983/1984	331,9	4,80
1984/1985	347,1	5,54
1985/1986	478,6	14,25
1986/1987	477,8	21,82
1987/1988	365,0	10,31
1988/1989	360,7	4,16
1989/1990	406,8	6,29
1990/1991	517,9	5,51
1991/1992	535,3	2,66
1992/1993	340,4	13,80
1993/1994	367,2	7,77
1994/1995	361,7	8,04

Etude de la relation pluie-apport de l'Oued Sikkak

1995/1996	531,4	6,33
1996/1997	305,1	11,47
1997/1998	393,2	15,15
1998/1999	295,9	11,67
1999/2000	319,5	4,11
2000/2001	458,0	6,14
2001/2002	457,0	20,71
2002/2003	463,6	16,09
2003/2004	540,6	12,32
2004/2005	366,9	6,45
2005/2006	394,2	5,97
2006/2007	372,8	4,74
2007/2008	364,5	4,24
2008/2009	634,5	25,98
2009/2010	528,5	10,08
2010/2011	405,9	10,52
2011/2012	403,9	10,03
2012/2013	621,2	36,92
2013/2014	418,0	32,75
2014/2015	495,6	31,80
2015/2016	321,2	21,04
2016/2017	419,4	19,13
2017/2018	516,1	23,21
2018/2019	382,4	20,77
2019/2020	392,4	23,80
2020/2021	288,0	16,66
2021/2022	328,5	18,91
2022/2023	241,6	12,02

La figure III-1 illustre une forte variabilité interannuelle des précipitations et des apports en eau dans la zone d'étude. Ces deux paramètres fluctuent considérablement d'une année à l'autre, reflétant les dynamiques hydrologiques complexes de la région. Par exemple, entre 1984/1985 et 1987/1988, on observe une augmentation des précipitations suivie d'une baisse notable, une tendance qui se reflète également dans les apports en eau. Globalement, il existe une corrélation positive entre les précipitations annuelles moyennes et les apports annuels : lorsque les précipitations augmentent, les apports en eau augmentent également, et lorsque les précipitations diminuent, les apports suivent la même tendance.

Cette corrélation est particulièrement visible lors des années de pics de précipitations comme 1986/1987, 2008/2009, et 2012/2013, où les apports montrent également des augmentations significatives. Ces années sont marquées par des précipitations exceptionnellement élevées, qui se traduisent par une augmentation des volumes d'eau écoulés vers l'Oued, en réponse directe aux conditions climatiques favorables.

Cependant, certaines années, comme 1991/1992 et 1995/1996, montrent un comportement différent. Bien que les précipitations moyennes annuelles soient relativement importantes, les apports en eau restent faibles. Ce phénomène peut être expliqué par des processus d'infiltration plus intenses, où l'eau de pluie s'infiltrerait dans le sol plutôt que de ruisseler vers les cours d'eau.

L'infiltration peut être influencée par divers facteurs, tels que la structure du sol, la couverture végétale ou encore les conditions d'humidité préalable, qui limitent la transformation directe des précipitations en écoulement de surface.

À partir du pic de précipitations enregistré en 2012/2013, on observe une diminution continue des deux paramètres, suggérant une baisse significative des apports en eau. Cette tendance est probablement liée à une réduction des précipitations dans les années qui suivent, reflétant une possible évolution vers des conditions climatiques plus sèches. Cette diminution des apports pourrait avoir des implications importantes pour la gestion des ressources en eau, en particulier pour les réservoirs et les barrages qui dépendent de ces apports pour leur remplissage.

En résumé, la figure III-1 met en évidence non seulement la relation étroite entre précipitations et apports, mais aussi la complexité des interactions entre ces deux paramètres, influencées par des facteurs tels que l'infiltration et les conditions climatiques variables d'une année à l'autre. Ces observations soulignent l'importance de surveiller les tendances climatiques et hydrologiques à long terme pour une gestion efficace des ressources en eau dans la région.

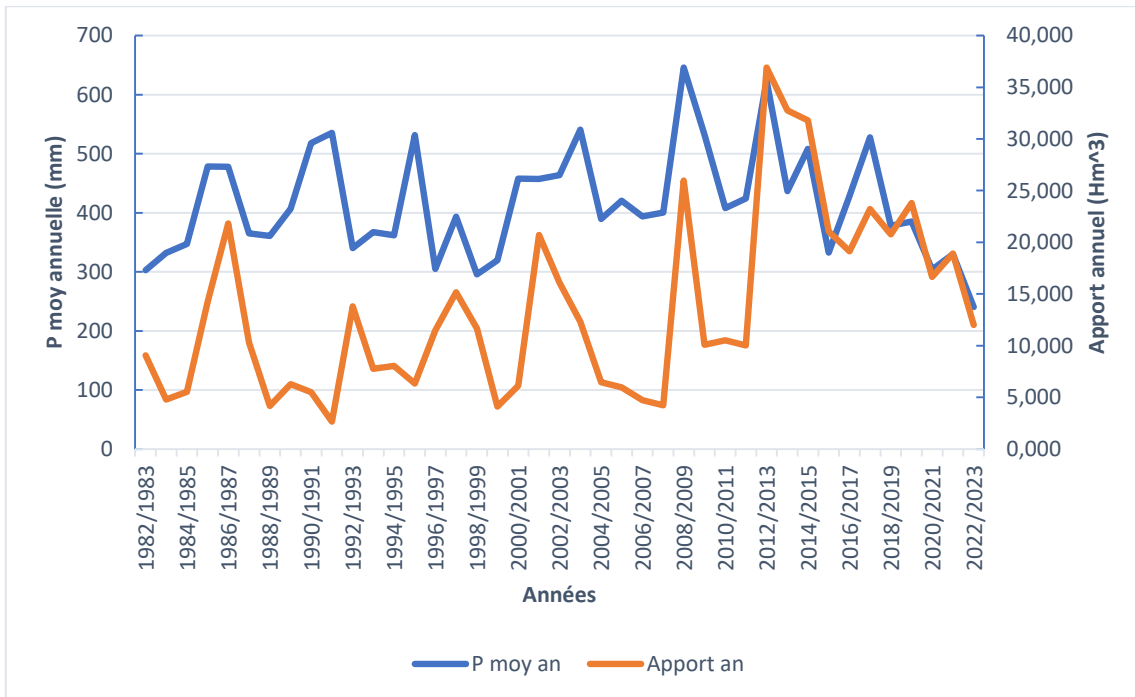


Figure III-1: Variation des précipitations moyennes annuelles des 4 stations étudiées et des apports en eau à la station du barrage de Sikkak.

III.2 La modélisation pluie-débit par la corrélation simple

La modélisation pluie-débit par corrélation simple est une méthode utilisée pour établir une relation directe entre les précipitations (pluies) et les débits des cours d'eau ou des bassins versants.

L'application de ce modèle nécessite les données annuelles et mensuelles des pluies (entrant) et des débits (sortant) de notre bassin versant. Nous avons reporté les valeurs annuelles et mensuelles des pluies et des débits dans l'annexe.

III.2.1 Corrélation pluie-apport au pas de temps annuel

Les résultats des figures III-2 et III-3 révèlent que la modélisation pluie-débit basée sur une corrélation simple, calculée sur un pas de temps annuel, aboutit à des coefficients de corrélation très faibles dans les quatre cas étudiés. Les corrélations significatives sont principalement obtenues avec un modèle linéaire. Plus précisément, le coefficient de corrélation entre les précipitations moyennes du bassin et les apports, exprimés en lames d'eau, s'élève à environ 0,34, ce qui correspond à un coefficient de détermination de 0,1193.

Cela signifie qu'il n'y a qu'une faible relation entre les précipitations et les débits observés dans cette zone d'étude. En d'autres termes, seulement environ 12 % de la variation des apports en eau peut être expliquée par les précipitations. Cette faible corrélation peut être attribuée à divers facteurs externes qui influencent le ruissellement et le débit, comme l'infiltration, l'évapotranspiration, la capacité de rétention du sol, et d'autres processus hydrologiques complexes.

Ainsi, cette analyse montre que d'autres variables doivent être prises en compte pour mieux comprendre et modéliser les apports en eau dans la région, car les précipitations seules ne suffisent pas à prédire précisément les débits. Cela souligne également la nécessité d'approches de modélisation plus sophistiquées, intégrant des facteurs climatiques et hydrologiques supplémentaires, pour améliorer la compréhension et la gestion des ressources en eau dans la zone du bassin versant étudié.

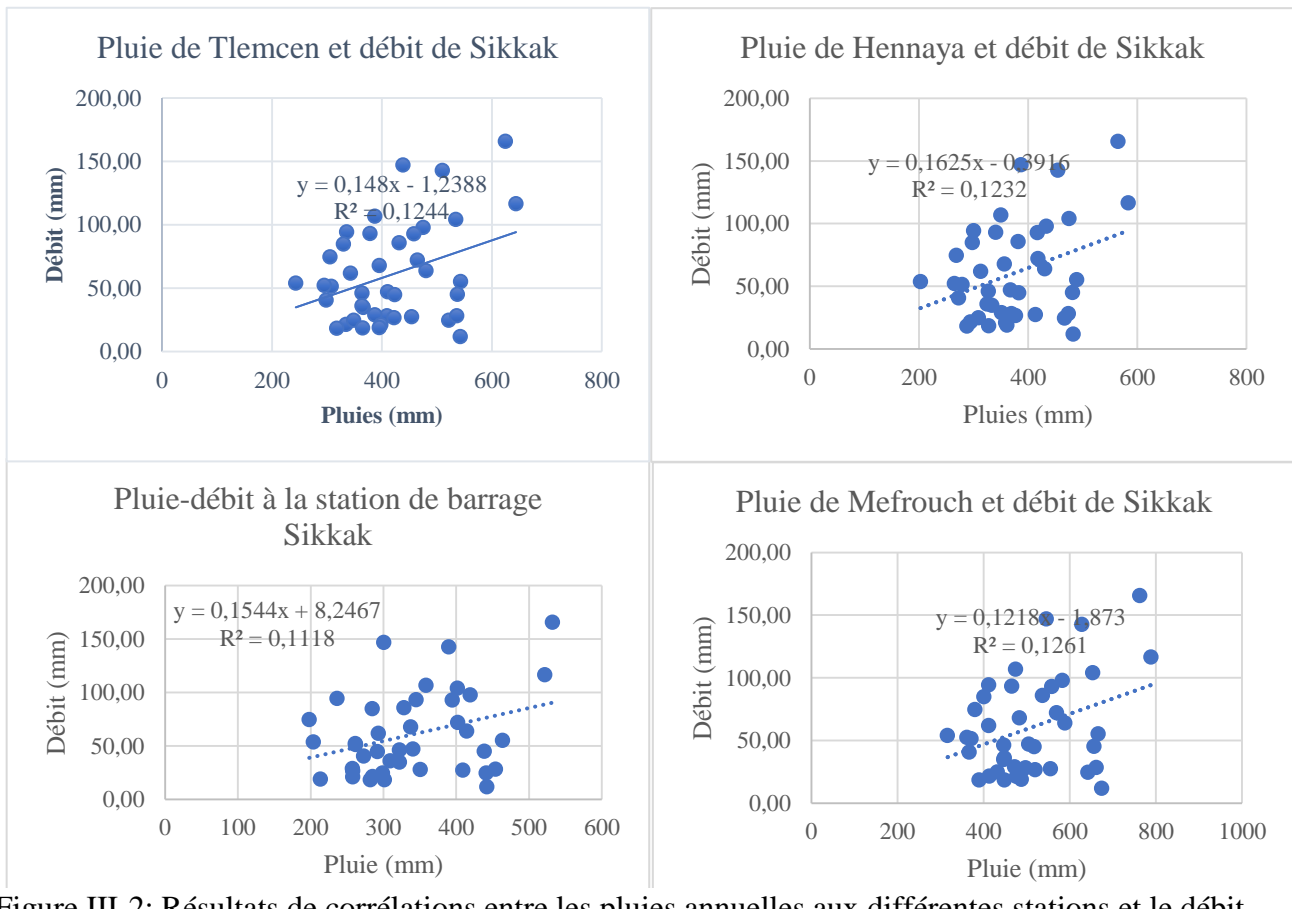


Figure III-2: Résultats de corrélations entre les pluies annuelles aux différentes stations et le débit annuel à la station Sikkak.

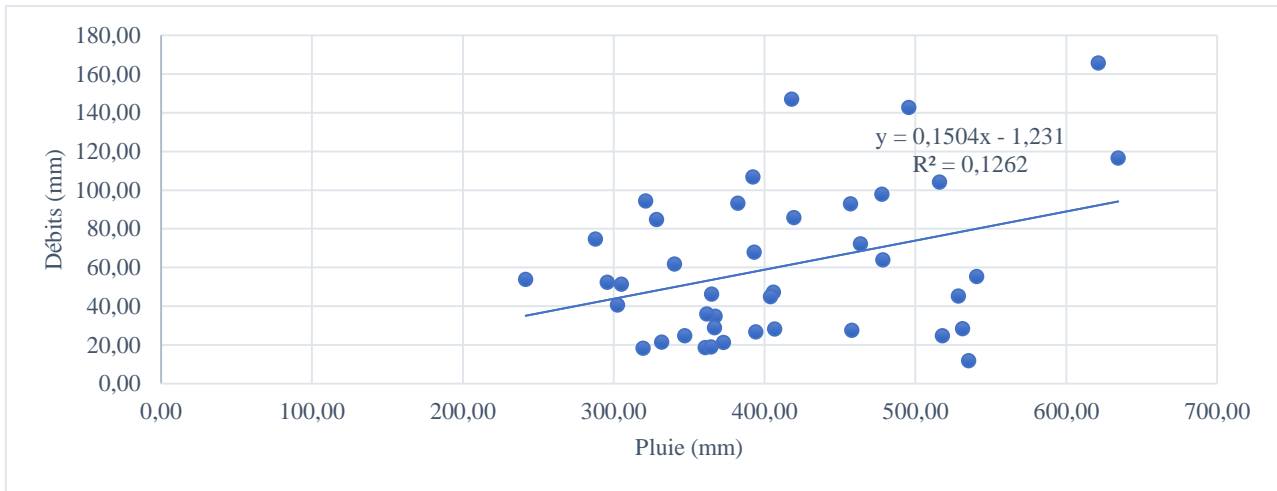


Figure III-3: Résultats de corrélation des Pmoy an et les débits annuels de Sikkak.

III.2.2 Corrélation pluie-débit au pas de temps mensuel

Le modèle pluie-débit, analysé au pas de temps mensuel, montre des résultats plus favorables que ceux obtenus au pas de temps annuel. En effet, le coefficient de corrélation moyen (figure III-4) atteint environ 0,5, ce qui correspond à un coefficient de détermination (R^2) de 0,2387. Cela signifie que près de 24 % de la variation des débits mensuels peuvent être expliquée par les précipitations mensuelles. Bien que cette relation soit plus forte que celle obtenue à l'échelle annuelle, elle reste modérée et ne peut pas être considérée comme pleinement satisfaisante pour la prédiction fiable des débits à partir des précipitations seules.

Ce résultat suggère que des facteurs supplémentaires, tels que l'infiltration, l'évaporation, la rétention du sol, ou d'autres variables hydrologiques, influencent la relation entre les précipitations et les débits. En conséquence, cette corrélation mensuelle, bien qu'améliorée, ne permet toujours pas de prédire précisément les débits dans la région d'étude.

Pour surmonter ce problème et obtenir des prévisions plus robustes, nous proposons d'utiliser des modèles hydrologiques plus complexes, tels que les modèles de Génie Rural (GR1A et GR2M). Ces modèles sont mieux adaptés aux spécificités hydrologiques locales et intègrent des paramètres supplémentaires, ce qui devrait permettre d'établir des relations plus significatives entre les précipitations et les débits. Leur utilisation devrait améliorer la précision des prévisions hydrologiques, en tenant compte de la complexité des processus d'écoulement et de la variabilité des conditions climatiques dans la région.

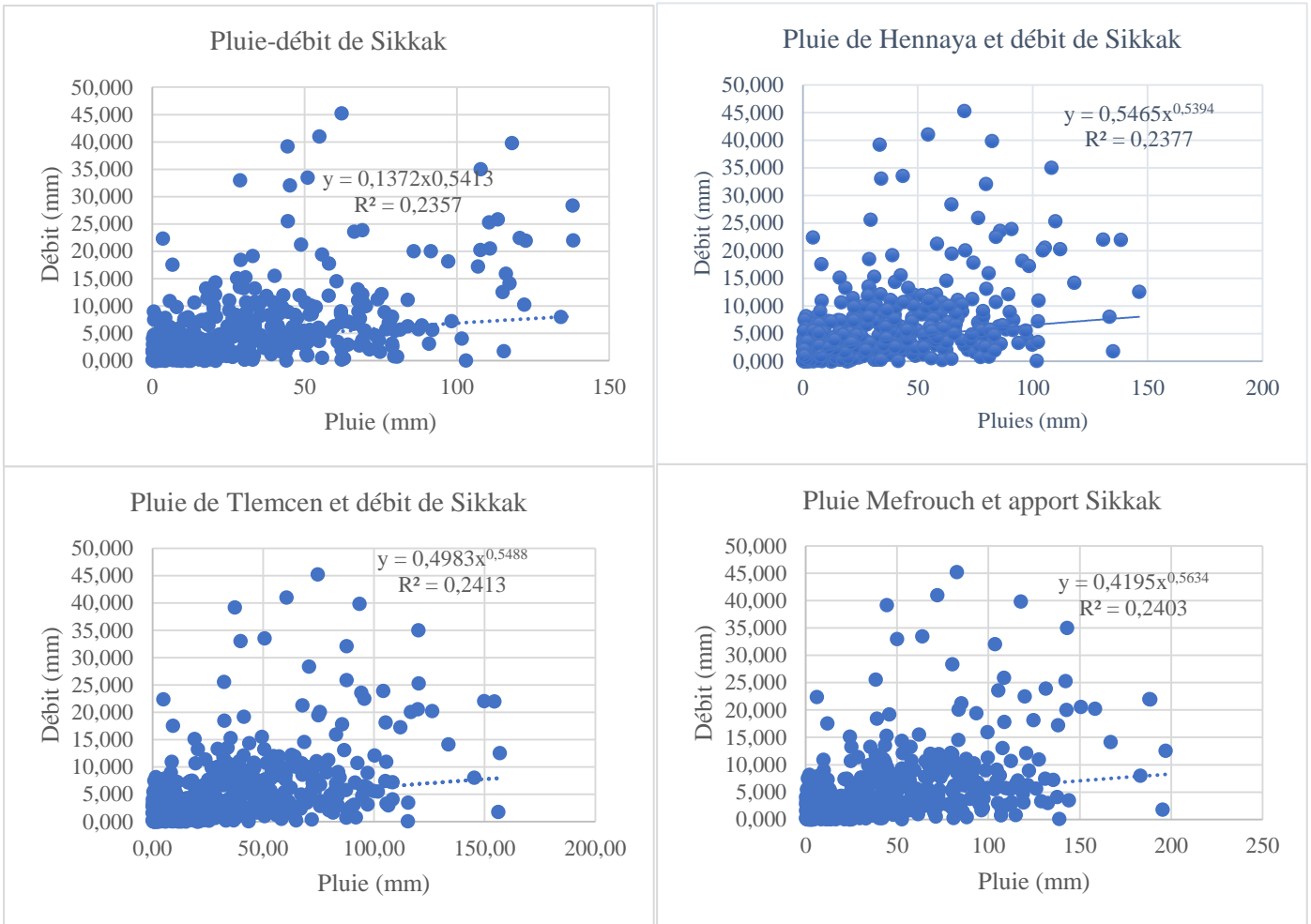


Figure III-4: Résultats de corrélations entre la P mensuelle aux différentes stations et le débit à la station du barrage Sikkak (1982/1983-2022/2023)

III.3 La modélisation pluie-débit par le modèle GR

III.3.1 Modèle pluie-débit annuel GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle global de simulation pluie-débit développé par le Cemagref à la fin des années 1990. Ce modèle a été conçu pour répondre aux besoins d'évaluation et de gestion des ressources en eau, tout en restant simple et efficace. Son principal objectif est de fournir un outil robuste et fiable, capable de simuler les écoulements annuels à partir des précipitations tout en limitant la complexité des calculs.

Le GR1A se distingue par sa simplicité, avec un seul paramètre optimisable, nommé paramètre X, qui est adimensionnel. Ce paramètre joue un rôle clé dans la modulation de l'évapotranspiration potentielle, ce qui permet de mieux ajuster la réponse du bassin versant aux précipitations reçues. En d'autres termes, le paramètre X régule la quantité d'eau qui s'évapore ou s'infiltre par rapport à celle qui contribue aux débits. Grâce à cette approche, le modèle est capable de simuler les écoulements tout en prenant en compte les pertes hydriques du bassin.

L'équation du modèle GR1A s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0,7 * P_k + 0,3 * P_{k-1}}{X * E} \right)^2 \right]^{0,5}} \right\}$$

L'avantage majeur du GR1A réside dans sa simplicité d'implémentation et son faible besoin en données. Il ne nécessite pas de vastes séries de mesures hydrologiques, ce qui en fait un modèle idéal pour les bassins où les données sont limitées ou incomplètes. Malgré sa simplicité, il offre des résultats acceptables pour de nombreuses applications hydrologiques à long terme, en particulier pour l'estimation des ressources en eau disponibles dans un bassin versant sur une base annuelle.

Cependant, en raison de sa nature globale, le modèle peut montrer des limites pour des simulations à des échelles temporelles plus fines (mensuelles ou journalières), ou dans des bassins présentant une variabilité hydrologique complexe. Pour ces cas, l'utilisation de modèles plus détaillés, comme le GR2M, qui inclut des paramètres supplémentaires pour affiner les prédictions, peut être envisagée.

III.3.1.1 Le calage du modèle GR1A

Pour cette validation, nous avons utilisé les séries de données de précipitations, de débits et d'évapotranspiration correspondant à la période de 1982/1983 à 2011/2012.

La procédure de calage du modèle GR1A a impliqué l'optimisation du paramètre unique X pour maximiser la précision des simulations de débit. Ce processus a consisté à ajuster la valeur de X en fonction des précipitations observées aux différentes stations, avec l'objectif d'atteindre les meilleurs critères de qualité pour le modèle.

Pour cela, nous avons testé diverses valeurs pour le paramètre X et évalué la performance du modèle à l'aide de deux critères principaux : le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) et le coefficient de corrélation entre les précipitations et les débits modélisés.

Le critère de Nash-Sutcliffe est utilisé pour mesurer la proportion de la variance des observations qui est expliquée par le modèle. Il est calculé comme suit :

Une valeur du critère de Nash-Sutcliffe supérieure ou égale à 0,7 (ou 70 %) indique que le modèle est performant et reproduit correctement les variations observées des débits en fonction des précipitations. Nous avons répété les ajustements du paramètre X jusqu'à ce que nous atteignions un NSE optimal supérieur ou égal à 70 %, ce qui garantit que le modèle reflète adéquatement les dynamiques hydrologiques du bassin.

En parallèle, nous avons surveillé le coefficient de corrélation entre les précipitations et les débits modélisés pour vérifier que la relation entre ces deux variables restait robuste et acceptable. Un coefficient de corrélation élevé indique une bonne concordance entre les précipitations et les débits simulés, ce qui renforce la validité du modèle.

Ainsi, en combinant ces deux critères de qualité, nous avons pu ajuster le modèle pluie-débit de manière à ce qu'il reproduise au mieux les dynamiques hydrologiques observées dans le bassin versant étudié, assurant une simulation précise et fiable des apports en eau.

Tableau III-2: Résultats du calage de GR1A

Paramètres	Nash	X	Bilan	R ²
Valeurs	87,3	0,10	98,0%	0,82

Les résultats obtenus à partir du critère de Nash-Sutcliffe, du coefficient de détermination (tableau III-2), ainsi que la bonne superposition des débits observés et simulés (figure III-5) montrent que le modèle pluie-débit GR1A est très bien ajusté. De plus, nous observons une forte corrélation entre les précipitations et les débits. Cette corrélation s'explique par le fait que plus il pleut, plus l'eau peut s'écouler vers le bassin versant ou la rivière.

Le critère de Nash-Sutcliffe indique que le modèle reproduit fidèlement les variations des débits observés, tandis que le coefficient de détermination confirme que la majeure partie de la variabilité des débits peut être expliquée par le modèle. La bonne superposition des courbes des débits observés et simulés renforce la confiance dans la précision du modèle. Cette forte corrélation entre les précipitations et les débits est attendue, car les précipitations sont la principale source d'apport en eau pour un bassin versant.

En conséquence, ce résultat satisfaisant de calage nous permet de passer à l'étape suivante : la validation du modèle. La validation consiste à tester le modèle sur un ensemble de données indépendantes pour vérifier sa robustesse et sa capacité à prédire les débits sous différentes conditions climatiques et hydrologiques.

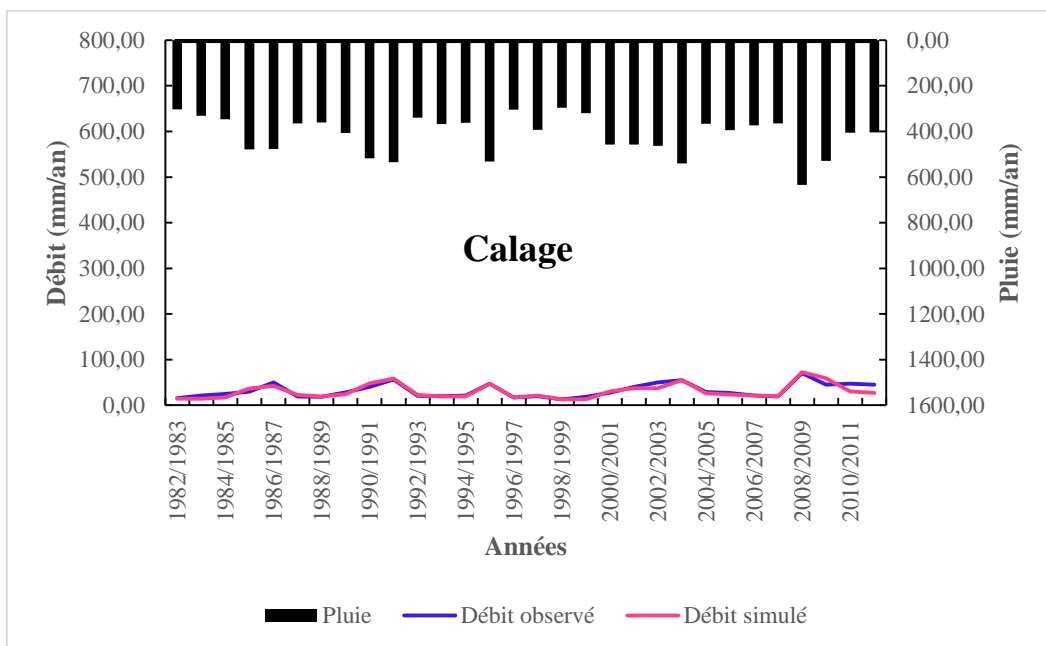


Figure III-5: Visualisation de la qualité du calage

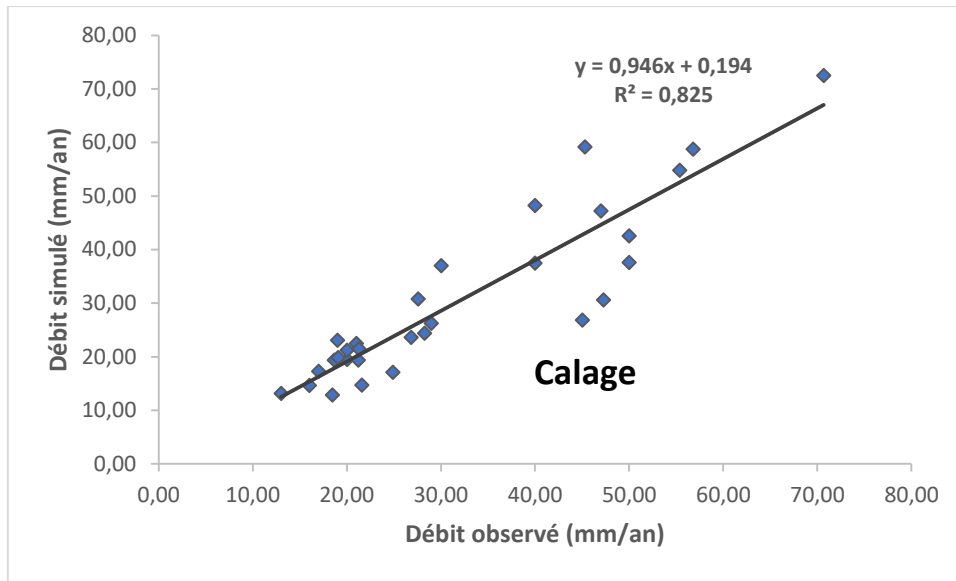


Figure III-6: Corrélation entre le débit simulé et le débit observé

III.3.1.2 Validation du modèle GR1A

Cette étape de validation consiste à appliquer le modèle à une série de données distinctes de celles utilisées lors du calage. Pour cette validation, nous avons utilisé les séries de données de précipitations, de débits et d'évapotranspiration correspondant à la période de 2012/2013 à 2022/2023.

L'objectif de la validation est de vérifier si le modèle, calibré sur une autre période, est capable de reproduire avec précision les débits observés sur cette nouvelle période. En utilisant des données indépendantes, nous évaluons la robustesse et la fiabilité du modèle dans des conditions variées.

Les étapes de cette validation incluent :

1. Préparation des données : Collecte et traitement des données de précipitations, de débits et d'évapotranspiration pour la période de 2012/2013 à 2022/2023.
2. Application du modèle : Utilisation du modèle calibré pour simuler les débits sur la période de validation.
3. Comparaison des résultats : Comparaison des débits simulés avec les débits observés pour évaluer la performance du modèle.
4. Analyse des critères de performance : Calcul des critères de performance tels que le critère de Nash-Sutcliffe, le coefficient de détermination et l'analyse graphique des résultats.

Si le modèle démontre une bonne performance sur cette période de validation, cela renforcera la confiance en sa capacité à prédire les débits sous diverses conditions climatiques et hydrologiques. Un modèle validé avec succès peut être utilisé pour des applications pratiques comme la gestion des ressources en eau, la prévision des crues et l'élaboration de stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Tableau III-3: Résultats de validation de GR1A

Paramètres	Nash	X	Bilan	R ²
Valeurs	70,9%	0,10	84,4%	0,80

Le tableau III-3 et la figure III-7 montrent que le modèle pluie-débit GR1A est bien validé. Les résultats du critère de Nash-Sutcliffe (70,9%), du bilan (84,4%) et du coefficient de détermination (R² de 0,80) indiquent une bonne performance du modèle. La superposition des courbes de débits observés et simulés confirme que le modèle capture efficacement la relation entre les précipitations et les débits.

Ces résultats montrent que le modèle GR1A reproduit fidèlement les débits observés à partir des données de précipitations, avec une capacité à expliquer 80% de la variabilité des débits (R² de 0,80) et un critère de Nash-Sutcliffe de 70,9%, ce qui est considéré comme un bon indicateur de performance. Le bilan de 84,4% indique que le modèle parvient également à bien reproduire le volume total des débits.

La validation réussie du modèle GR1A signifie qu'il peut être utilisé pour prévoir les débits futurs à partir des précipitations, ce qui est fondamental pour la gestion des ressources en eau. En particulier, le modèle peut être employé pour :

1. Aider à anticiper les débits futurs en fonction des prévisions de précipitations, ce qui est essentiel pour la gestion proactive des ressources en eau.
2. Aider à planifier et à gérer les opérations des barrages, notamment en ce qui concerne le stockage de l'eau et la prévention des inondations.
3. Informer les stratégies d'adaptation aux changements climatiques en prévoyant les impacts des variations de précipitations sur les régimes de débit.
4. Prévoir les épisodes de crues et mettre en place des mesures de prévention pour minimiser les impacts sur les communautés et les infrastructures.

En conclusion, le modèle pluie-débit GR1A validé est un outil puissant pour comprendre et gérer la relation pluie-débit à long terme, contribuant ainsi à une gestion durable et efficace des ressources en eau.

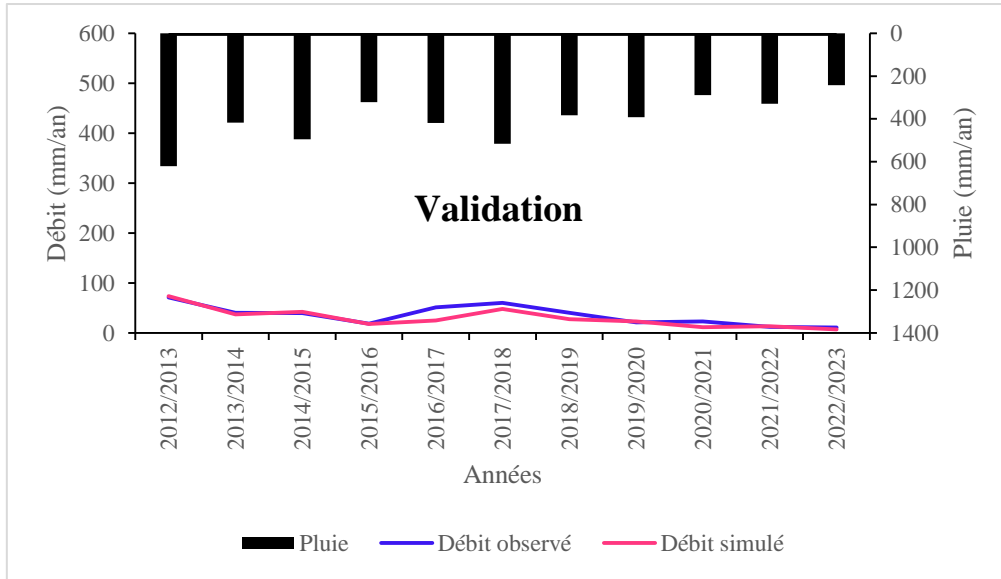


Figure III-7: Visualisation de la validation

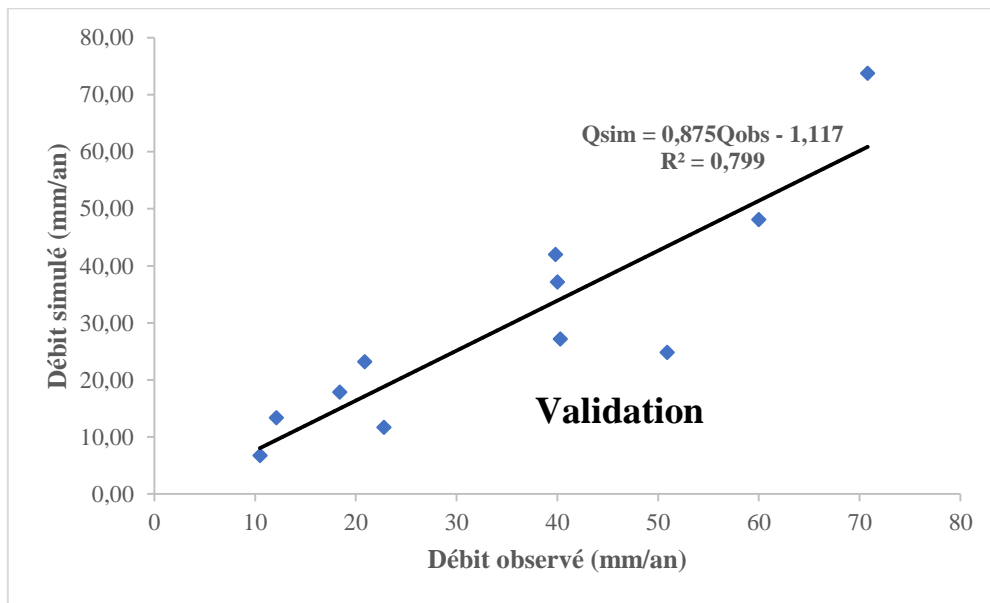


Figure III-8: Corrélation entre le débit simulé et le débit observé

III.3.2 Modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle de simulation hydrologique utilisé pour modéliser le comportement hydrologique d'un bassin versant à l'échelle mensuelle. Il a été conçu pour simuler les relations entre précipitations et écoulements dans les bassins versants de manière simple mais efficace, tout en tenant compte des dynamiques hydrologiques clés à cette échelle temporelle. Ce modèle a été développé à partir des mêmes principes que le GR1A, mais il inclut deux paramètres optimisables au lieu d'un, ce qui le rend plus flexible et mieux adapté à la modélisation des débits sur une base mensuelle.

III.3.2.1 Caractéristiques et structure du modèle GR2M

Le modèle GR2M repose sur deux réservoirs : un réservoir de production et un réservoir de restitution. Il simule les écoulements à partir des précipitations et prend en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans le calcul du bilan hydrologique. Les précipitations sont tout d'abord stockées dans le réservoir de production, où elles sont modulées par les pertes dues à l'évapotranspiration, avant de générer un écoulement vers le réservoir de restitution. Ce dernier réservoir contrôle la libération de l'eau vers le cours d'eau principal sous la forme de débit.

Les deux paramètres optimisables du modèle sont les suivants :

- X1 : représente la capacité du réservoir de production, influençant la manière dont le bassin stocke l'eau provenant des précipitations.
- X2 : détermine la régulation de l'écoulement par le réservoir de restitution, affectant la vitesse et la manière dont l'eau est restituée au cours d'eau.

III.3.2.2 Fonctionnement du modèle

Les différentes étapes de fonctionnement du modèle sont suivantes :

Étape 1 : Précipitations et évapotranspiration

- Les précipitations mensuelles (P) sont soumises aux pertes par évapotranspiration potentielle (ETP), ce qui permet de déterminer la quantité d'eau disponible pour le bassin. La différence (P - ETP) représente l'eau effective qui peut soit alimenter le réservoir de production, soit générer du ruissellement direct.

Étape 2 : Réservoir de production

- Une partie de l'eau effective est stockée dans le réservoir de production, dont la capacité est définie par le paramètre (X1). Ce réservoir agit comme un modérateur, absorbant l'excès d'eau pendant les périodes pluvieuses et le restituant lentement durant les périodes sèches.

Étape 3 : Ruissellement et infiltration

- L'excès d'eau dans le réservoir de production peut générer un écoulement vers le réservoir de restitution, où le paramètre (X2) joue un rôle crucial. Le ruissellement direct (écoulement rapide) est également modélisé à cette étape, représentant l'eau qui atteint rapidement les cours d'eau sans passer par les réservoirs.

Étape 4 : Réservoir de restitution et débit simulé

- Le réservoir de restitution agit comme un tampon régulant la libération de l'eau vers le cours d'eau principal, influencé par le paramètre (X2). Il contrôle les débits de base (écoulement retardé) et l'écoulement rapide. Le débit mensuel simulé est la somme de ces deux types d'écoulements.

III.3.2.3 Étapes de calage et validation

Le processus de calage du modèle GR2M consiste à ajuster les paramètres (X1) et (X2) pour que les débits simulés par le modèle correspondent le mieux possible aux débits observés. Le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) est souvent utilisé comme mesure de la qualité de la simulation, tout comme dans le modèle GR1A. Un bon ajustement est caractérisé par un NSE supérieur à 0,7, ce qui indique que le modèle est capable de reproduire les fluctuations observées des débits mensuels en fonction des précipitations.

III.3.2.4 Avantages du modèle GR2M

Le modèle GR2M présente plusieurs avantages notamment :

✚ Simplicité et robustesse : Grâce à sa structure simple et à son petit nombre de paramètres, le modèle GR2M est relativement facile à calibrer et à appliquer sur des bassins versants avec peu de données disponibles.

✚ Modélisation à l'échelle mensuelle : Le modèle est spécialement conçu pour capturer les dynamiques hydrologiques à l'échelle mensuelle, ce qui en fait un outil efficace pour la gestion des ressources en eau dans des environnements soumis à des variations saisonnières importantes.

✚ Adaptation aux conditions locales : En ajustant les deux paramètres clés, le modèle peut être adapté aux spécificités hydrologiques des bassins versants, permettant une meilleure simulation des apports en eau et des débits.

III.3.2.5 Limites et perspectives

Bien que le modèle GR2M soit relativement performant, il présente certaines limites. Par exemple, en raison de sa simplicité, il peut ne pas capturer toutes les dynamiques complexes associées aux événements extrêmes tels que les crues soudaines ou les sécheresses prolongées. De plus, l'hypothèse de linéarité dans les réservoirs peut ne pas convenir à certains types de bassins versants fortement régulés ou avec des interactions complexes entre les précipitations et l'infiltration.

Cependant, avec des ajustements appropriés et en combinaison avec d'autres modèles ou analyses, le GR2M reste un outil puissant pour la modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle, fournissant des informations essentielles pour la gestion des ressources hydriques dans des régions à climat méditerranéen ou semi-aride, comme c'est le cas de notre zone d'étude.

III.3.3 Application sur le bassin d'oued Sikkak et Résultats

III.3.3.1 Calage du modèle GR2M

La calibration du modèle GR2M consiste à introduire les données pertinentes et à vérifier l'ajustement du modèle en analysant les résultats numériques et graphiques. Pour quantifier la précision des résultats, deux critères d'ajustement sont utilisés : le coefficient de corrélation R et le critère de Nash-Sutcliffe (NSE).

Le processus de calibration implique la modification des valeurs des paramètres X_1 et X_2 du modèle. Les plages de variation pour ces paramètres sont les suivantes :

- X_1 : entre 140 mm et 2640 mm
- X_2 : entre 0,21 mm et 1,31 mm

Les paramètres sont ajustés avec un intervalle de 0,001 jusqu'à obtenir les valeurs optimales pour le coefficient de détermination R^2 et le critère de Nash-Sutcliffe, en visant des valeurs égales ou supérieures à 70%.

Pour la phase de calage, nous avons utilisé les données mensuelles de précipitations (P), de débits (Q) et d'évapotranspiration potentielle (ETP) correspondant à la période allant de septembre 1982 jusqu'à avril 2011.

Le processus de calage comprend les étapes suivantes :

1. Collecte et traitement des données mensuelles de P, Q, et ETP pour la période de septembre 1982 à avril 2011.
2. Entrée des séries de données dans le modèle GR2M.
3. Modification des valeurs des paramètres X_1 et X_2 dans les plages spécifiées pour maximiser les critères d'ajustement.
4. Évaluation des résultats du modèle en utilisant les critères de corrélation R et de Nash-Sutcliffe.
5. Vérification de la bonne superposition des courbes des débits observés et simulés pour confirmer l'ajustement visuel du modèle.

Ce processus permet d'ajuster le modèle GR2M de manière optimale, en assurant une bonne représentation des relations entre les précipitations, les débits et l'évapotranspiration dans le bassin versant étudié.

Tableau III-4: Résultats du calage de GR2M.

Paramètres	Nash	X1	X2	Bilan	R ²
Valeurs	89,6%	403,63	0,80	91,6%	0,75

Le tableau III-4 et la figure III-9 montrent que le modèle pluie-débit GR2M est bien calibré. Les résultats obtenus avec le critère de Nash-Sutcliffe (89,6%), le bilan (91,6%) et le coefficient de détermination (R^2 de 0,75) indiquent une performance élevée du modèle. La superposition des courbes de débit observé et simulé confirme que le modèle capture efficacement la dynamique hydrologique du bassin versant.

La forte performance du modèle, comme le montrent les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe et du coefficient de détermination, signifie que le modèle GR2M parvient à expliquer une grande partie de la variabilité des débits observés. Un critère de Nash-Sutcliffe de 89,6% indique que le modèle reproduit très bien les variations des débits, tandis qu'un bilan de 91,6% montre que le modèle simule avec précision le volume total des débits. Un coefficient de détermination (R^2) de 0,75 suggère que 75% de la variance des débits observés est expliquée par le modèle.

De plus, la superposition des courbes de débit observé et simulé indique que le modèle GR2M est capable de suivre les fluctuations des débits sur la période de calibration, capturant ainsi les principaux pics et creux.

La figure III-10 montre la corrélation entre les précipitations et les débits, particulièrement visible lors des périodes de fortes précipitations qui entraînent des pics de débit. Cette corrélation souligne l'efficacité du modèle à représenter l'effet direct des précipitations sur les débits.

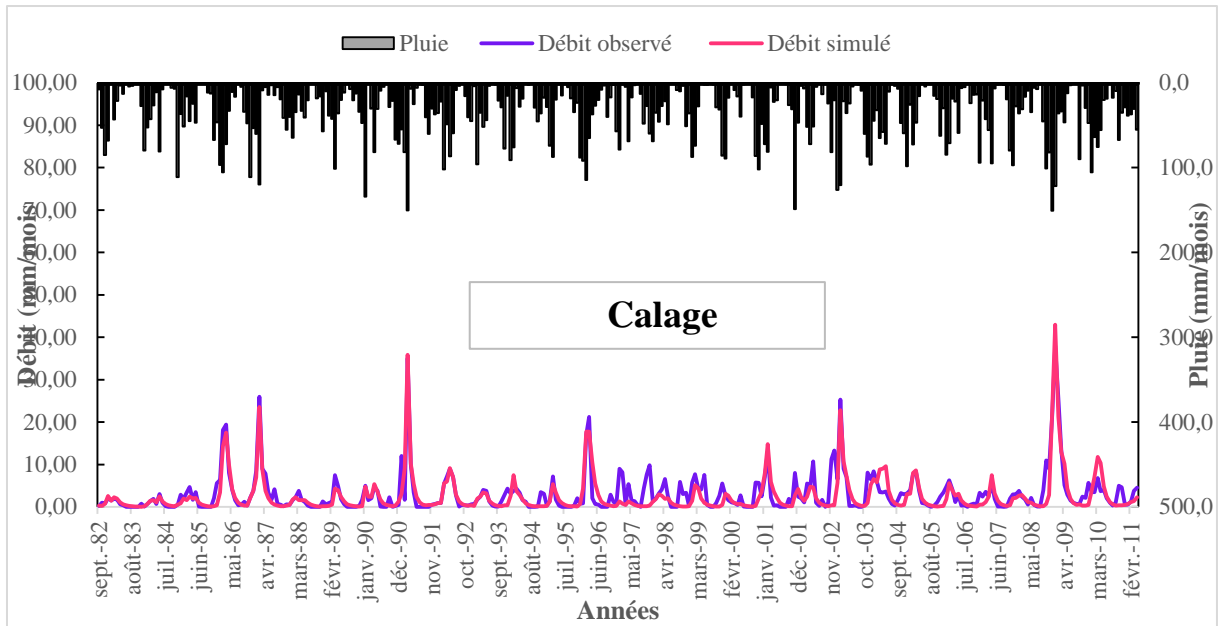


Figure III-9: Visualisation de la qualité du calage.

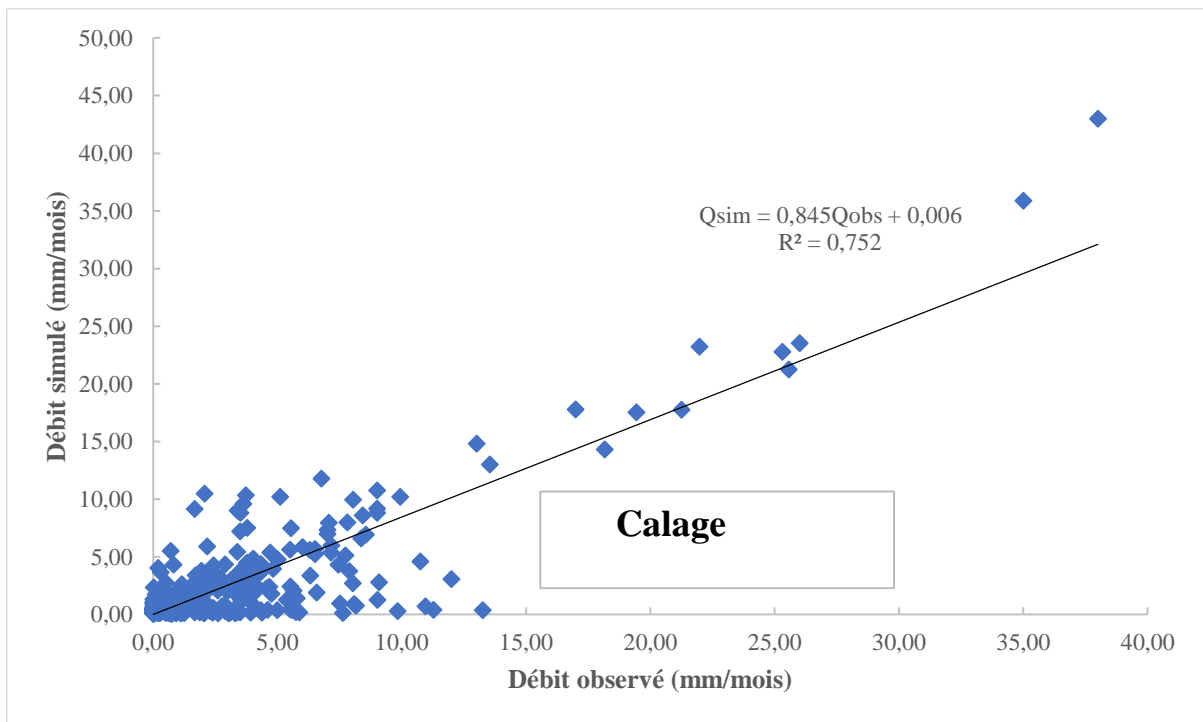


Figure III-10: Corrélation entre le débit simulé et le débit observé de GR2M.

III.3.3.2 Validation du modèle GR2M

Pour cette étape de validation, nous allons utiliser les données mensuelles de précipitations, de débits et d'évapotranspiration correspondant à la période de mai 2011 à août 2023, qui n'ont pas été introduites dans le modèle lors de la phase de calibration. La validation comprend les mêmes étapes utilisées pour le pas annuel.

La validation du modèle GR2M sur une nouvelle période de données, de mai 2011 à août 2023, permettra de confirmer sa robustesse et sa fiabilité, renforçant ainsi sa valeur comme outil pour la gestion des ressources en eau et la planification hydrologique à long terme.

Tableau III-5: Résultats de validation de GR2M

Paramètres	X1	X2	Nash	Bilan	R ²
Valeurs	403,43	0,80	43,4%	47,7%	0,63

Les résultats de la validation du modèle GR2M montrent une performance modérée. Le critère de Nash-Sutcliffe de 43,4% et le coefficient de détermination R² de 0,63 indiquent que le modèle est capable de reproduire une partie significative des variations des débits observés, mais avec certaines limitations.

Analyse des Résultats de Validation

1. Critères de Performance :

- Critère de Nash-Sutcliffe (43,4%) : Ce critère indique que le modèle explique environ 43,4% de la variabilité des débits observés. Bien que ce soit une amélioration par rapport à un modèle aléatoire, cela suggère que le modèle a des difficultés à capturer toutes les nuances des variations des débits, notamment lors des périodes de débits élevés.

- Coefficient de Détermination (R²) (0,63) : Ce coefficient montre que le modèle explique 63% de la variance des débits observés. Cela témoigne d'une capacité raisonnable à représenter les relations entre les précipitations et les débits, mais indique également qu'il reste 37% de variance non expliquée.

2. Analyse Graphique :

- Les graphiques montrent que les débits simulés suivent les tendances des débits observés, ce qui indique que le modèle est capable de reproduire les dynamiques générales du bassin versant. Cependant, des différences notables apparaissent, surtout pour les périodes de débits élevés, où le modèle semble moins précis.

Interprétation des Résultats

- Malgré les limitations, le modèle GR2M reste utile pour prédire les débits mensuels en fonction des précipitations mensuelles. Il peut fournir des indications sur l'impact de la pluviométrie sur les apports du bassin versant Sikkak, ce qui est important pour la gestion des ressources en eau.

- Les divergences observées, notamment pour les débits élevés, suggèrent que le modèle pourrait ne pas reproduire entièrement les effets des événements de précipitation extrêmes ou les réponses hydrologiques complexes du bassin versant.

- Pour améliorer la performance du modèle, il pourrait être utile d'explorer des approches de calibration plus détaillées, d'envisager des ajustements dans les paramètres du modèle, ou d'incorporer des données supplémentaires pour mieux saisir les dynamiques hydrologiques.

En résumé, bien que la validation du modèle GR2M révèle des performances modérées, le modèle reste encore un outil valable pour analyser l'impact des précipitations sur les débits mensuels du bassin versant Sikkak. Les résultats soulignent l'importance de continuer à affiner et à ajuster le modèle pour améliorer sa précision, en particulier lors des périodes de débits élevés.

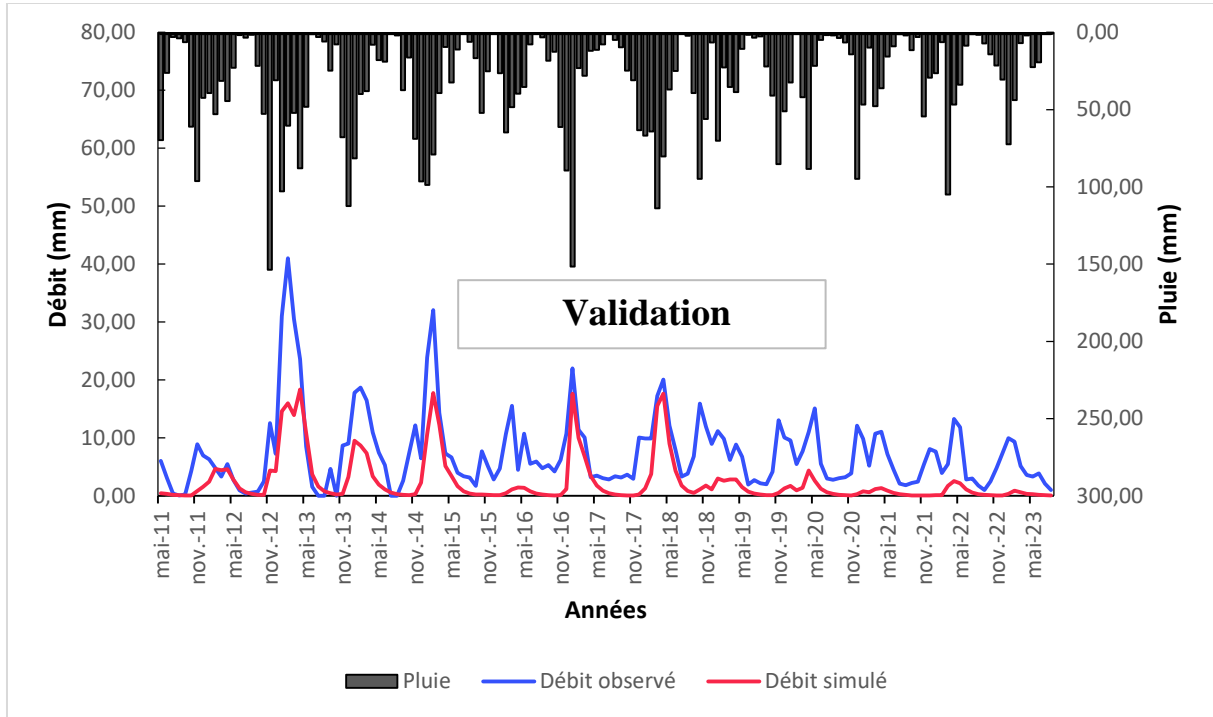


Figure III-11: Visualisation de la qualité de validation de GR2M

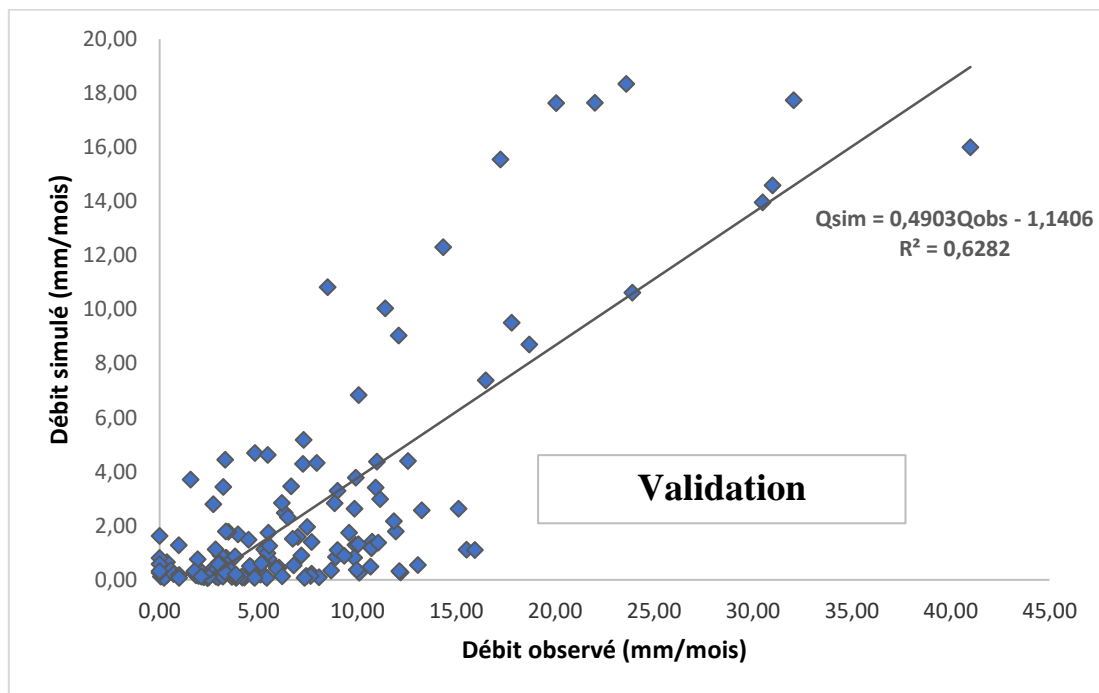


Figure III-12: Corrélation entre le débit simulé et observé de GR2M.

III.3.3.3 Les résultats de simulation des débits à partir de GR.

Pour estimer la variabilité des débits annuels du bassin versant de l'Oued Sikkak, nous avons effectué des simulations des débits pour des événements récurrents (10 ans, 100 ans et 1000 ans) en utilisant la série de précipitations validée. Les valeurs des pluies moyennes ont été remplacées par celles estimées par l'étude statistique de cette série, ce qui a permis au GR1A de calculer les débits (mm) et d'avoir les apports correspondants (tableau III.6).

Tableau III-6: Résultats trouvés à partir de simulation à l'aide de modélisation hydrogéologique (GR).

Période de retour	Qsim (mm)	Apport (Hm ³)
10	46,45	10,3
100	69	15,3
1000	88,31	19,6

Les résultats de tableau III-6 montrent une augmentation significative des débits avec la durée de la période de retour, ce qui est attendu puisque les événements rares tendent à être plus intenses. Cependant, les valeurs restent faibles, ce qui peut refléter une sous-estimation des événements extrêmes par le modèle hydrogéologique utilisé.

III.3.4 Comparaison des résultats des apports trouvés par l'étude statistique et par simulation de GR.

Les résultats (tableau III-7 et tableau III-8) montrent que les estimations obtenues par modélisation hydrogéologique (GR) sont nettement inférieures aux estimations obtenues par l'étude statistique. Cela pourrait indiquer que le modèle hydrologique sous-estime la variabilité future des apports, potentiellement en raison de limitations dans la représentation des phénomènes extrêmes ou des incertitudes dans les paramètres du modèle.

Ces divergences mettent en évidence une incertitude importante dans les prévisions futures. Pour la gestion des ressources en eau notamment la gestion du barrage de Sikkak et tout autre risque lié à la pluviométrie, il est impératif de considérer les résultats statistiques, qui suggèrent une plus grande variabilité et intensité des événements futurs. Cela confirme l'importance de prendre en compte les différents scénarios et de renforcer les infrastructures et plans d'adaptation pour faire face à des événements extrêmes potentiellement plus sévères.

Tableau III-7: Résultats des apports obtenus par simulation.

Période de retour (ans)	Qsim (mm)	Apport (Hm ³)
10	46,45	10,3
100	69	15,3
1000	88,31	19,6

Tableau III-8: Résultats des apports obtenus par l'étude statistique

Période de retour	Débit (mm)	Apport (Hm ³)
10	153,37	34
100	360,88	80
1000	667,62	148

III.3.5 Conclusion

Dans ce chapitre l'étude a porté sur l'analyse de la relation entre les précipitations et les apports hydrologiques au bassin de l'Oued Sikkak, à travers l'utilisation des modèles de prévision hydrologique GR1A et GR2M. L'étude a révélé que le modèle GR1A est particulièrement performant pour la prévision des débits annuels, affichant une corrélation solide avec les débits observés, ce qui le rend utile pour la gestion à long terme des ressources en eau. De plus, le modèle GR1A calé et validé sur les données du bassin et barrage Sikkak nous a permis de faire la simulation des débits annuels futurs pour des événements de fréquences données.

En revanche, le modèle GR2M a montré des performances plus modérées, avec des écarts notables lors des événements de précipitations extrêmes. Bien que le modèle soit efficace pour prédire les débits mensuels, il présente des difficultés pour les débits élevés, ce qui souligne les défis liés à la précision des prévisions durant les périodes de forte pluviométrie. Ces analyses soulignent l'importance de sélectionner le modèle de prévision approprié en fonction des objectifs spécifiques de gestion et des conditions climatiques. La capacité des modèles à reproduire les tendances générales des débits, malgré certaines limites, met en lumière la nécessité de continuer à affiner les outils de prévision pour mieux gérer les ressources en eau dans le contexte de la variabilité climatique.

Aussi, malgré les défis posés par les événements climatiques extrêmes, les modèles hydrologiques peuvent fournir des prévisions utiles pour la gestion des apports en eau afin de mieux anticiper et gérer les impacts de la variabilité climatique sur le remplissage du barrage de Sikkak.

Conclusion générale et Recommandations.

L'objectif de notre thématique était d'étudier l'influence de la variabilité pluviométrique sur l'apport du barrage de Sikkak, situé dans le bassin versant de l'oued Sikkak affluent de la Tafna NW-Algérien. Cette étude s'est faite par l'analyse des données historiques et récentes d'hydro-climatiques notamment celles des précipitations, températures, apports ou débits et évapotranspiration du bassin versant.

A travers cette étude, nous avons dégagé les résultats principaux suivants :

L'étude morphologique a révélé que notre bassin versant présente une forme allongée ($K_c = 1,6$) avec une superficie 221,68 km², son relief est assez fort selon la classification d'ORSTOM et une densité moyennement drainée (1,28 km/km²).

La température moyenne annuelle déterminée aux différentes stations (Sikkak, Hennaya, Tlemcen et Mefrouche) du BV est environ 17°C, avec janvier est le plus froid et Aout le plus chaud. Les précipitations moyennes varient de 416 mm, où l'hiver est la plus humide tandis que l'été est sec.

L'apport annuel maximal (36,9 Mm³) a été enregistré en 2013 suite une pluviométrie importante enregistrée et l'apport moyen est de 13,5 Mm³.

L'indice climatique a précisé que notre zone d'étude se caractérise par un climat semi-aride ($I = 15,47$) et un écoulement temporaire.

La modélisation hydrologique, à l'aide des modèles GR1A et GR2M, nous a permis d'identifier les corrélations entre les précipitations et les apports en eau du bassin versant. Les résultats ont montré que, malgré les défis posés par les événements climatiques extrêmes, le modèle GR1A offre une bonne performance pour la prévision des débits annuels de l'oued Sikkak, tandis que le modèle GR2M montre des performances modérées pour les prévisions mensuelles, surtout en période de précipitations extrêmes. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'affiner les outils de prévision pour mieux gérer les apports en eau, particulièrement dans des conditions climatiques de plus en plus incertaines.

Ces résultats sont essentiels pour orienter la gestion future du barrage de Sikkak, en vue d'assurer une disponibilité en eau durable dans un contexte climatique incertain.

Les recommandations pour améliorer la gestion du barrage Sikkak et optimiser les ressources hydriques dans le bassin de la Tafna :

- ❖ **Renforcement de la Surveillance** : Installer des stations supplémentaires et utiliser des technologies modernes (comme satellite) pour améliorer la collecte des données climatiques et hydrologiques.
- ❖ **Amélioration des Modèles de Prévision** : Affiner les modèles hydrologiques existants (GR1A, GR2M) avec des techniques avancées pour accroître la précision des prévisions des débits, en particulier lors des événements extrêmes.
- ❖ **Adaptation au Changement Climatique** : Mettre en place des stratégies pour faire face aux variations climatiques, telles que l'augmentation des capacités de stockage et l'amélioration des infrastructures de gestion de l'eau pour réduire les pertes.

Conclusion générale et Recommandations

- ❖ **Recherche et développement** : Encourager la recherche sur des technologies innovantes pour la conservation de l'eau, telles que la réutilisation et les systèmes d'irrigation efficaces.
- ❖ **Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)** : Promouvoir une gestion coordonnée des ressources en eau en tenant compte des besoins de tous les secteurs et en renforçant la coopération entre les parties prenantes.
- ❖ **Sensibilisation et Formation** : Développer des programmes de sensibilisation pour les communautés locales et offrir des formations sur les meilleures pratiques de gestion de l'eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdallah, S. (2019). La problématique du risque d'inondation en milieu urbain : cas de la ville d'El Bayadh (Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra), 96 p.

Bemmoussat, A. (2012). Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin versant de la Tafna, Mémoire de magister, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, 156 p.

Berrezoug, T. et Kissi, S. (2002). La protection du futur – Barrage « Sikkak » contre la pollution et l'envasement. Mémoire, Ing, Hydraulique, Univ Tlemcen. 107 p.

Bouanani, A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW— Algérie) (Thèse de doctorat en hydraulique appliqué, Université de Tlemcen), 225 p.

Boudjadja, A., Messahel, M. & Pauc, H. (2003). Ressources hydriques en Algérie du Nord. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 16(3), pp.285-304. <https://doi.org/10.7202/705508ar>

Boussaïd, A., Souiher, N. et Djaballah, F. (2012). Contribution à une étude climatique comparative entre deux trentaines d'années (1913-138) et (1975-2009) : Cas de la région de Djelfa. Le Journal égyptien du changement environnemental, 4(4), p.23-43.

Bureau D'études Lombardi, (2005). Monographie du barrage d'Ain Youcef, Ministère des ressources en eau Agence Nationale des barrages Direction des Etudes Techniques.

Elhoussaoui A., Baba-Hamed K., Bouanani A., Amours, K. (2016). Hydrologie et modélisation de la fonction pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Tamanrasset sud Algérie.

Hayane, S.M. (1983). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen) (Thèse de doctorat 3e cycle, Université d'Oran), 236 p. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8)

Haied, N. (2015). Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux souterraines. (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba), 193p.

Iratni, N. (2014). Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versant de la Tafna (Mémoire de magister, Université d'Oran), 143 p.

Kadi, A. (1997). La gestion de l'eau en Algérie. Hydrological Sciences Journal, 42(2), pp.191-197. DOI : 10.1080/02626669709492019

Khadija, L., Khadija, O., Chaima, E. (2021). Etude hydrologique du bassin versant de Tnine Ourika (Haut Atlas, Maroc) (PFE, Faculté des sciences et techniques de Marrakech), 56 p.

Kazi-Tani, H., Gherissi, R., Zegnoui, A., Bouanani, A., Baba-Hamed, K., Terfous, A., & Probst, J.-L. (2023). "Impact de la variabilité du régime pluvial saisonnier sur les

ruissellements et l'érosion des versants (cas du bassin versant du barrage de Beni-Bahdel)." Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 29 (2), pp. 127-139.

DOI:10.4000/geomorphologie.17901

Kettab, A. (2001). Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. Revue de Désalinisation, 136, pp.25-33. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8)

Kheira, M. (2012). Hydrologie et modélisation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tafna NW-Algérien) (Mémoire de Magister, Univ. de Tlemcen), 121 p.

Messatfa, K. (2015). Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques : cas du bassin de la Tafna. (Thèse de Magister, Uni. Oran), 110 p.

Merkache, S., Zair, Z. (2017). Contribution à la quantification du Transport Solide dans un cours d'eau : Cas du bassin versant de l'Oued Sikkak (N.W algérien) (Mémoire de master, Univ. de Tlemcen), 160 p.

Michel-Kouassi, Amani., Ferland-Kouamé, K., Albert-Goula, B., Théophile, L., Emmanuel-Paturel, J., & Biemi, J. (2008). Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du n'zi (bandama) en côte d'ivoire. Revue ivoire science technologie, 15(11), pp.207-229.

Ousmane, A., Sekkour, I., Athmani, B. (2022). Mobilisation des eaux de surface : commentaires généraux sur les barrages dans le passé, présent et futur, 20, pp.107-121. DOI 10.17561/at.20.5298

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. : <http://www.cemagref.fr/webgr>

Rahima, B. (2010). Modélisation de la fonction pluie-débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW-ALGERIEN). (Mémoire de Magister, Université de Tlemcen), 105 p.

Souad, H. (2017). Analyse de la variabilité hydro climatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : le Sebou au Maroc, 10(1), pp.1-19.

ZAOUI, R. (2022). Modélisation hydrologique pluie-débit appliqué au sous bassin de bassin versants d'oued Ressoul (Nord-Est Algérien) (Mémoire de master, Université 08 Mai 1945 de Guelma).

Zohra, S.F. (2008). LA POLITIQUE DE L'EAU EN ALGERIE : VALORISATION ET DEVELOPPEMENT DURABLE. Revue d'économie et de statistique appliquée, 5(2), pp.96-114.

Webographie :

<https://climat.be> : climat-et-meteo (site des données climatiques).

<https://climate.northwestknowledge.net>

<https://fr.wikipedia.org>: Liste des barrages en Algérie

<https://horizon.documentation.ird.fr> : Formules d'évapotranspiration.

<https://download.geofabrik.de/>

<https://gadm.org/>

<https://earth.google.com/web/>

<https://openai.com>. Intelligence artificielle

<https://www.perplexity.ai>. Intelligence artificielle

www.DeepL.com/Translator (free version)

Annexes

Annexe 1 : Les valeurs des précipitations observées par ordre croissant

Station Mefrouche (1974/1975-2020/2021)

Rang	Année	P.an	Fi	Uexp
1	1981/1982	349,7	0,0106	-2,3
2	1998/1999	361,7	0,0319	-1,85
3	1982/1983	366,6	0,0532	-1,61
4	1996/1997	371,1	0,0745	-1,44
5	2020/2021	379,7	0,0957	-1,31
6	1999/2000	389,9	0,1170	-1,19
7	2015/2016	411,9	0,1383	-1,09
8	1992/1993	412,3	0,1596	-1
9	1983/1984	413,4	0,1809	-0,91
10	1984/1985	431,9	0,2021	-0,84
11	1987/1988	446,6	0,2234	-0,76
12	1993/1994	446,6	0,2447	-0,69
13	1994/1995	448,2	0,2660	-0,62
14	1988/1989	448,7	0,2872	-0,56
15	2018/2019	465,5	0,3085	-0,5
16	2004/2005	472	0,3298	-0,44
17	2019/2020	474,1	0,3511	-0,39
18	2006/2007	476,4	0,3723	-0,33
19	1997/1998	483,3	0,3936	-0,27
20	2007/2008	487,7	0,4149	-0,21
21	1989/1990	497,7	0,4362	-0,16
22	2010/2011	504,9	0,4574	-0,11
23	2011/2012	517,6	0,4787	-0,05
24	1978/1979	519,1	0,5000	0
25	2005/2006	519,8	0,5213	0,05
26	1977/1978	530,1	0,5426	0,11
27	2016/2017	537	0,5638	0,16
28	2013/2014	546	0,5851	0,21
29	2000/2001	555,2	0,6064	0,27
30	2001/2002	558,6	0,6277	0,33
31	2002/2003	569,8	0,6489	0,39
32	1986/1987	583,2	0,6702	0,44
33	1985/1986	589,1	0,6915	0,5
34	2014/2015	628,3	0,7128	0,56
35	1990/1991	642	0,7340	0,62
36	2017/2018	653,7	0,7553	0,69
37	2009/2010	656,2	0,7766	0,76
38	1995/1996	661,5	0,7979	0,84
39	2003/2004	666	0,8191	0,91
40	1991/1992	674,2	0,8404	1
41	1976/1977	675,3	0,8617	1,09

42	1979/1980	713,3	0,8830	1,19
43	1974/1975	722,1	0,9043	1,31
44	1980/1981	726,6	0,9255	1,44
45	1975/1976	737,3	0,9468	1,61
46	2012/2013	763	0,9681	1,85
47	2008/2009	788,5	0,9894	2,3

Station de Tlemcen (1978/1979 – 2020/2021)

Rang	Année	P.an	F(x)	Uexp
1	1981/1982	289,7	0,0116	-2,27
2	1998/1999	294,9	0,0349	-1,81
3	1982/1983	298,8	0,0581	-1,57
4	2020/2021	305,8	0,0814	-1,4
5	1996/1997	308	0,1047	-1,25
6	1999/2000	318	0,1279	-1,114
7	1983/1984	334,8	0,1512	-1,03
8	2015/2016	336	0,1744	-0,94
9	1992/1993	343	0,1977	-0,85
10	1984/1985	348,4	0,2209	-0,77
11	1994/1995	363,9	0,2442	-0,69
12	1987/1988	364	0,2674	-0,62
13	1988/1989	364,9	0,2907	-0,55
14	1993/1994	366,1	0,3140	-0,48
15	2018/2019	378,4	0,3372	-0,42
16	2019/2020	386,9	0,3605	-0,36
17	2004/2005	387,1	0,3837	-0,29
18	1997/1998	395,2	0,4070	-0,23
19	2007/2008	395,3	0,4302	-0,18
20	2006/2007	398,1	0,4535	-0,12
21	1989/1990	409,4	0,4767	-0,06
22	2010/2011	410,2	0,5000	0
23	2005/2006	421,9	0,5233	0,06
24	2011/2012	423,3	0,5465	0,12
25	1978/1979	426,9	0,5698	0,18
26	2016/2017	431	0,5930	0,23
27	2013/2014	438,1	0,6163	0,29
28	2000/2001	454	0,6395	0,36
29	2001/2002	457,8	0,6628	0,42
30	2002/2003	464,3	0,6860	0,48
31	1986/1987	475	0,7093	0,55
32	1985/1986	480,3	0,7326	0,62
33	2014/2015	509,8	0,7558	0,69
34	1990/1991	521,7	0,7791	0,77
35	2017/2018	534,1	0,8023	0,85
36	1995/1996	536,1	0,8256	0,94

37	2009/2010	537,3	0,8488	1,03
38	1991/1992	542,3	0,8721	1,114
39	2003/2004	543,1	0,8953	1,25
40	1979/1980	585,6	0,9186	1,4
41	1980/1981	588,5	0,9419	1,57
42	2012/2013	624,7	0,9651	1,81
43	2008/2009	644	0,9884	2,27

Station de Hennaya (1975/1976-2019/2020)

Rang	Année	P.an	F(x)	Uexp
1	1981/1982	265	0,0111	-2,29
2	1998/1999	271,9	0,0333	-1,83
3	1982/1983	278	0,0556	-1,59
4	1996/1997	283,8	0,0778	-1,42
5	1999/2000	293,7	0,1000	-1,28
6	1983/1984	303,7	0,1222	-1,16
7	2015/2016	308,6	0,1444	-1,06
8	1984/1985	318,6	0,1667	-0,97
9	1992/1993	319,1	0,1889	-0,88
10	1994/1995	334,4	0,2111	-0,8
11	1987/1988	335,4	0,2333	-0,73
12	1988/1989	335,6	0,2556	-0,66
13	1993/1994	339	0,2778	-0,59
14	2018/2019	347,9	0,3000	-0,53
15	2019/2020	355,8	0,3222	-0,46
16	2004/2005	359,8	0,3444	-0,4
17	1997/1998	363,1	0,3667	-0,34
18	2007/2008	366	0,3889	-0,28
19	2006/2007	368,3	0,4111	-0,22
20	1989/1990	375,3	0,4333	-0,17
21	2010/2011	376,2	0,4556	-0,11
22	2005/2006	385	0,4778	-0,06
23	2016/2017	391,1	0,5000	0
24	2011/2012	391,7	0,5222	0,06
25	1978/1979	394,9	0,5444	0,11
26	2013/2014	398,3	0,5667	0,17
27	1977/1978	404	0,5889	0,22
28	2000/2001	422,5	0,6111	0,28
29	2001/2002	426,3	0,6333	0,34
30	2002/2003	428	0,6556	0,4
31	1986/1987	437,4	0,6778	0,46
32	1985/1986	442,6	0,7000	0,53
33	2014/2015	466,2	0,7222	0,59
34	1990/1991	478,4	0,7444	0,66
35	1995/1996	486,7	0,7667	0,73
36	2017/2018	490	0,7889	0,8
37	1991/1992	492,1	0,8111	0,88

38	2009/2010	492,5	0,8333	0,97
39	1976/1977	497,5	0,8556	1,06
40	2003/2004	500,1	0,8778	1,16
41	1980/1981	540,7	0,9000	1,28
42	1979/1980	542,9	0,9222	1,42
43	1975/1976	559,3	0,9444	1,59
44	2012/2013	578	0,9667	1,83
45	2008/2009	594,1	0,9889	2,29

Station de Barrage Sikkak (1982/1983-2022/2023).

Rang	Année	P. annuelle	$f_i = (i-0,5)/N$	Uexp
1	2022/2023	198,3	0,0122	-2,28
2	1998/1999	261,4	0,0366	-1,79
3	1996/1997	261,9	0,0610	-1,55
4	2020/2021	262,2	0,0854	-1,37
5	1982/1983	272,5	0,1098	-1,23
6	2015/2016	281,4	0,1341	-1,11
7	1999/2000	281,9	0,1585	-1
8	1983/1984	285,2	0,1829	-0,91
9	2021/2022	289,4	0,2073	-0,82
10	1992/1993	293	0,2317	-0,73
11	1984/1985	298,8	0,2561	-0,65
12	1988/1989	301,2	0,2805	-0,58
13	1994/1995	309,3	0,3049	-0,51
14	1987/1988	322	0,3293	-0,44
15	1993/1994	322,1	0,3537	-0,38
16	2018/2019	327,3	0,3780	-0,31
17	2019/2020	328,6	0,4024	-0,26
18	1997/1998	337,4	0,4268	-0,18
19	2006/2007	341,8	0,4512	-0,13
20	2004/2005	347,2	0,4756	-0,06
21	2010/2011	348	0,5000	0
22	1989/1990	350,5	0,5244	0,06
23	2007/2008	356,1	0,5488	0,12
24	2005/2006	363,7	0,5732	0,18
25	2016/2017	364,4	0,5976	0,25
26	2011/2012	373,6	0,6220	0,3
27	2013/2014	375,8	0,6463	0,37
28	2001/2002	394,3	0,6707	0,44
29	2002/2003	401,9	0,6951	0,51
30	2000/2001	409	0,7195	0,58
31	1985/1986	414,4	0,7439	0,65
32	1986/1987	419,1	0,7683	0,73
33	2014/2015	439,4	0,7927	0,82
34	1990/1991	441,2	0,8171	0,91
35	1991/1992	442,2	0,8415	1
36	2017/2018	447,6	0,8659	1,11

37	2009/2010	452,4	0,8902	1,23
38	1995/1996	453,9	0,9146	1,37
39	2003/2004	463,7	0,9390	1,55
40	2012/2013	541,6	0,9634	1,79
41	2008/2009	568,1	0,9878	2,28

Annexe2 : Les valeurs des apports annuels classées par ordre croissant à la station du barrage Sikkak.

Rang	AP, an	Ln (AP, an)	F(X)	Uexp
1	2,661	0,9789	0,0122	-2,25
2	4,106	1,4124	0,0366	-1,79
3	4,156	1,4247	0,0610	-1,55
4	4,245	1,4457	0,0854	-1,37
5	4,737	1,5554	0,1098	-1,23
6	4,802	1,5691	0,1341	-1,11
7	5,507	1,7061	0,1585	-1
8	5,538	1,7116	0,1829	-0,91
9	5,973	1,7872	0,2073	-0,82
10	6,135	1,8140	0,2317	-0,73
11	6,288	1,8387	0,2561	-0,65
12	6,330	1,8453	0,2805	-0,58
13	6,452	1,8644	0,3049	-0,51
14	7,774	2,0508	0,3293	-0,44
15	8,037	2,0841	0,3537	-0,37
16	9,071	2,2051	0,3780	-0,31
17	10,028	2,3053	0,4024	-0,25
18	10,085	2,3110	0,4268	-0,18
19	10,310	2,3331	0,4512	-0,12
20	10,525	2,3537	0,4756	-0,06
21	11,471	2,4398	0,5000	0
22	11,668	2,4568	0,5244	0,06
23	12,016	2,4862	0,5488	0,12
24	12,325	2,5116	0,5732	0,18
25	13,795	2,6243	0,5976	0,25
26	14,253	2,6570	0,6220	0,31
27	15,149	2,7180	0,6463	0,37
28	16,089	2,7781	0,6707	0,44
29	16,656	2,8128	0,6951	0,51
30	18,909	2,9396	0,7195	0,58
31	19,130	2,9513	0,7439	0,65
32	20,713	3,0307	0,7683	0,73
33	20,773	3,0337	0,7927	0,82
34	21,038	3,0463	0,8171	0,91
35	21,823	3,0830	0,8415	1
36	23,209	3,1445	0,8659	1,11
37	23,801	3,1697	0,8902	1,23
38	25,979	3,2573	0,9146	1,37

39	31,804	3,4596	0,9390	1,55
40	32,749	3,4889	0,9634	1,79
41	36,923	3,6088	0,9878	2,25

Annexe 3 : Données du modèle GR1A

Années	P (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)
1982/1983	302,63	932,28	40,74
1983/1984	331,93	939,82	21,57
1984/1985	347,08	940,84	24,87
1985/1986	478,55	941,16	64,01
1986/1987	477,78	945,60	98,00
1987/1988	365,03	956,74	46,30
1988/1989	360,65	948,95	18,67
1989/1990	406,75	969,73	28,24
1990/1991	517,90	933,72	24,73
1991/1992	535,33	927,89	11,95
1992/1993	340,43	934,32	61,95
1993/1994	367,18	947,69	34,91
1994/1995	361,68	953,20	36,09
1995/1996	531,40	951,69	28,43
1996/1997	305,08	950,03	51,51
1997/1998	393,20	959,04	68,03
1998/1999	295,88	944,13	52,40
1999/2000	319,50	955,16	18,44
2000/2001	457,98	964,75	27,55
2001/2002	457,03	947,72	93,02
2002/2003	463,55	963,11	482,15
2003/2004	540,58	949,39	459,39
2004/2005	366,90	938,37	28,97
2005/2006	394,15	953,26	26,82
2006/2007	372,83	957,62	21,27
2007/2008	364,50	954,64	19,06
2008/2009	634,50	946,17	116,66
2009/2010	528,45	969,13	45,29
2010/2011	405,85	962,09	47,26
2011/2012	403,90	943,51	45,03
2012/2013	621,20	943,26	165,81
2013/2014	418,00	957,70	147,07
2014/2015	495,60	970,60	142,82
2015/2016	321,15	971,03	94,48
2016/2017	419,40	979,98	85,91
2017/2018	516,10	947,61	104,23
2018/2019	382,40	958,83	93,29
2019/2020	392,35	978,44	106,88
2020/2021	288,03	982,63	74,80

2021/2022	328,48	971,74	84,92
2022/2023	241,63	1000,84	53,96

Annexe 4 : Données du modèle GR2M

Année	P (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)
sept-82	7,80	96,24	0,24
oct-82	52,98	68,21	0,99
nov-82	85,25	43,39	6,99
déc-82	68,03	30,56	8,59
janv-83	0,00	34,82	6,73
févr-83	43,13	38,05	6,49
mars-83	21,40	58,25	4,00
avr-83	3,20	79,03	0,57
mai-83	12,95	104,38	0,36
juin-83	0,00	122,34	0,00
juil-83	4,28	134,05	0,00
août-83	3,63	122,96	0,00
sept-83	0,78	98,10	0,00
oct-83	0,80	73,92	0,00
nov-83	27,20	49,35	0,73
déc-83	79,95	35,36	2,08
janv-84	52,75	35,35	4,71
févr-84	42,75	38,63	5,36
mars-84	26,78	51,76	3,87
avr-84	11,28	81,09	0,71
mai-84	80,85	97,08	2,98
juin-84	7,83	117,25	0,96
juil-84	0,18	137,56	0,17
août-84	0,80	124,39	0,00
sept-84	5,80	96,48	0,00
oct-84	7,15	68,51	0,00
nov-84	111,30	45,97	4,07
déc-84	36,73	35,52	2,88
janv-85	51,35	31,52	4,69
févr-85	15,95	47,02	3,40
mars-85	45,25	51,29	4,66
avr-85	24,88	79,71	1,67
mai-85	47,13	101,72	3,47
juin-85	0,90	121,14	0,04
juil-85	0,65	136,16	0,00
août-85	0,00	125,81	0,00
sept-85	11,65	97,26	0,00
oct-85	12,68	72,30	0,00
nov-85	67,45	46,67	2,06
déc-85	46,75	34,65	5,60

janv-86	96,80	34,66	6,30
févr-86	105,60	40,97	18,15
mars-86	72,20	53,19	19,43
avr-86	32,83	71,28	8,03
mai-86	10,85	109,27	1,94
juin-86	16,48	119,16	1,60
juil-86	0,40	134,59	0,35
août-86	4,88	127,17	0,53
sept-86	34,30	96,86	1,18
oct-86	47,88	71,53	3,02
nov-86	111,08	43,66	7,23
déc-86	53,38	32,38	7,81
janv-87	60,18	34,58	8,55
févr-87	119,75	41,59	35,02
mars-87	8,93	57,49	17,55
avr-87	5,23	82,23	7,88
mai-87	14,30	105,08	3,32
juin-87	2,90	120,50	1,73
juil-87	14,70	133,05	4,13
août-87	5,18	126,65	0,57
sept-87	19,50	98,86	0,54
oct-87	41,28	72,27	3,09
nov-87	55,33	44,46	5,67
déc-87	40,15	38,10	8,21
janv-88	64,55	39,13	11,95
févr-88	34,50	41,00	9,79
mars-88	13,63	56,70	3,78
avr-88	32,85	80,30	1,66
mai-88	41,08	104,74	1,12
juin-88	20,50	117,52	0,32
juil-88	1,45	135,00	0,00
août-88	0,23	128,67	0,00
sept-88	18,48	95,69	0,00
oct-88	15,93	72,77	0,00
nov-88	57,33	47,10	1,25
déc-88	10,13	30,79	0,62
janv-89	38,63	34,13	0,88
févr-89	42,48	42,31	1,20
mars-89	101,45	57,48	7,44
avr-89	35,93	75,08	4,82
mai-89	20,00	105,67	1,84
juin-89	11,65	121,27	0,62
juil-89	1,25	137,49	0,00
août-89	7,43	129,15	0,00
sept-89	20,38	95,82	0,02
oct-89	12,48	73,16	0,01

nov-89	34,13	48,44	0,25
déc-89	47,38	40,55	1,66
janv-90	134,00	35,87	14,16
févr-90	0,13	47,24	1,61
mars-90	30,30	60,58	2,00
avr-90	81,70	75,88	4,70
mai-90	30,75	106,45	3,75
juin-90	9,40	122,14	0,09
juil-90	4,78	136,17	0,00
août-90	1,35	127,42	0,00
sept-90	28,50	100,78	2,28
oct-90	21,15	71,29	0,01
nov-90	67,10	44,67	0,23
déc-90	71,88	32,29	0,43
janv-91	54,90	33,17	11,98
févr-91	81,85	36,68	1,66
mars-91	150,45	55,62	1,78
avr-91	6,83	73,39	2,98
mai-91	25,13	99,92	3,37
juin-91	5,80	120,82	0,02
juil-91	1,78	136,30	0,00
août-91	2,55	128,79	0,00
sept-91	40,75	98,27	0,00
oct-91	60,15	67,42	0,00
nov-91	30,23	43,15	5,35
déc-91	37,20	33,98	7,25
janv-92	35,68	32,88	9,43
févr-92	22,25	40,29	10,18
mars-92	102,15	53,60	9,21
avr-92	48,73	78,04	7,16
mai-92	86,63	106,39	2,78
juin-92	59,50	113,15	1,43
juil-92	8,48	133,32	0,51
août-92	3,60	127,41	0,08
sept-92	0,98	96,53	0,50
oct-92	15,55	67,65	4,17
nov-92	40,40	44,00	3,76
déc-92	45,20	35,73	6,29
janv-93	4,10	33,00	6,67
févr-93	96,23	38,81	5,75
mars-93	35,38	56,12	8,39
avr-93	52,08	76,61	8,98
mai-93	44,08	103,92	10,76
juin-93	3,48	120,34	6,29
juil-93	0,88	134,58	0,32
août-93	2,10	127,03	0,08

sept-93	20,75	92,26	0,08
oct-93	28,98	67,70	1,25
nov-93	77,65	43,93	2,86
déc-93	15,45	34,52	4,33
janv-94	91,10	34,98	3,11
févr-94	75,93	41,51	3,77
mars-94	6,28	59,70	4,32
avr-94	28,00	75,80	3,28
mai-94	18,65	108,77	10,67
juin-94	0,73	121,50	1,24
juil-94	2,40	137,70	0,00
août-94	1,28	129,32	0,00
sept-94	29,30	93,74	0,00
oct-94	45,35	70,95	0,06
nov-94	35,90	47,40	3,49
déc-94	17,53	35,27	3,11
janv-95	28,48	34,99	9,24
févr-95	74,18	45,25	11,07
mars-95	87,45	56,95	7,14
avr-95	19,85	77,30	1,70
mai-95	1,78	110,24	0,28
juin-95	15,03	119,58	0,01
juil-95	1,73	135,03	0,00
août-95	5,13	126,50	0,00
sept-95	18,10	92,09	0,00
oct-95	34,55	73,26	0,25
nov-95	23,63	48,29	2,04
déc-95	88,03	38,90	0,75
janv-96	91,80	41,20	0,81
févr-96	114,70	39,66	0,06
mars-96	65,03	55,68	21,24
avr-96	37,15	78,58	2,07
mai-96	27,15	103,92	0,69
juin-96	20,08	121,49	0,51
juil-96	7,98	134,26	0,00
août-96	3,23	124,36	0,00
sept-96	40,10	91,95	0,00
oct-96	17,25	67,56	2,88
nov-96	2,48	45,42	1,20
déc-96	57,28	36,97	8,48
janv-97	78,55	40,04	9,01
févr-97	1,50	44,89	8,15
mars-97	4,70	58,26	22,36
avr-97	69,03	81,46	5,37
mai-97	16,98	106,96	1,37
juin-97	2,88	120,66	1,34

juil-97	1,35	131,31	0,34
août-97	13,00	124,56	0,02
sept-97	48,00	97,06	4,36
oct-97	27,23	73,25	7,62
nov-97	59,98	46,75	9,83
déc-97	68,73	36,23	14,55
janv-98	35,28	37,79	15,28
févr-98	45,83	44,86	3,17
mars-98	27,50	57,98	4,06
avr-98	21,60	77,67	6,57
mai-98	48,70	102,65	2,58
juin-98	1,08	121,60	0,01
juil-98	0,70	135,92	0,00
août-98	8,60	127,30	0,00
sept-98	9,88	96,54	5,87
oct-98	3,45	67,54	3,03
nov-98	51,25	45,28	3,29
déc-98	36,15	31,43	10,36
janv-99	87,55	35,45	5,77
févr-99	74,25	36,04	7,72
mars-99	27,68	56,47	4,33
avr-99	0,20	79,99	4,09
mai-99	0,83	110,38	7,51
juin-99	2,30	121,88	0,42
juil-99	0,25	135,56	0,00
août-99	2,10	127,58	0,00
sept-99	28,68	95,79	0,91
oct-99	31,50	73,56	2,60
nov-99	85,83	42,77	5,52
déc-99	89,38	33,19	2,63
janv-00	17,40	31,85	1,58
févr-00	0,00	43,73	1,07
mars-00	8,58	59,27	0,88
avr-00	16,10	78,82	0,43
mai-00	39,85	108,72	2,75
juin-00	2,13	123,77	0,07
juil-00	0,00	136,12	0,00
août-00	0,10	127,58	0,00
sept-00	17,30	96,52	0,00
oct-00	86,13	68,46	5,73
nov-00	102,25	44,73	5,64
déc-00	48,38	37,57	2,48
janv-01	72,10	38,47	7,05
févr-01	81,50	42,53	3,80
mars-01	5,53	63,24	2,17
avr-01	22,35	80,53	0,29

mai-01	20,60	105,27	0,39
juin-01	0,00	124,37	0,00
juil-01	0,00	135,18	0,00
août-01	1,85	127,88	0,00
sept-01	26,13	96,32	1,87
oct-01	30,95	75,17	13,28
nov-01	148,98	42,77	8,02
déc-01	46,80	33,70	2,42
janv-02	3,43	35,81	2,01
févr-02	6,60	43,08	1,05
mars-02	51,78	57,73	5,52
avr-02	72,43	77,81	45,24
mai-02	51,50	104,26	10,73
juin-02	4,83	122,87	0,95
juil-02	0,13	134,66	0,23
août-02	13,50	123,54	1,69
sept-02	1,50	95,43	0,01
oct-02	24,25	72,01	0,89
nov-02	81,65	45,45	11,27
déc-02	20,40	38,72	13,26
janv-03	126,08	33,61	20,24
févr-03	120,73	38,94	25,30
mars-03	21,75	59,31	0,28
avr-03	35,48	78,23	0,26
mai-03	24,25	107,67	0,19
juin-03	4,30	126,54	0,22
juil-03	1,28	137,25	0,34
août-03	1,90	129,97	0,00
sept-03	9,25	97,37	0,00
oct-03	60,23	71,46	0,53
nov-03	87,00	45,01	8,08
déc-03	96,48	34,26	6,51
janv-04	44,68	36,56	8,35
févr-04	32,33	43,23	18,45
mars-04	65,25	55,69	3,51
avr-04	57,78	77,74	3,39
mai-04	72,08	100,08	3,62
juin-04	10,28	123,20	1,93
juil-04	1,78	136,37	0,64
août-04	3,48	128,40	0,29
sept-04	7,13	97,43	1,68
oct-04	47,45	73,37	3,24
nov-04	59,35	42,16	2,93
déc-04	98,30	33,24	3,13
janv-05	25,83	27,55	3,94
févr-05	72,58	31,44	4,85

mars-05	47,05	55,89	8,42
avr-05	15,63	78,54	3,76
mai-05	1,25	111,27	0,88
juin-05	4,30	124,08	0,74
juil-05	0,83	137,09	0,31
août-05	0,50	126,29	0,01
sept-05	15,25	94,63	0,28
oct-05	19,23	72,43	1,10
nov-05	62,35	43,49	2,38
déc-05	29,93	32,73	3,40
janv-06	84,75	32,49	4,75
févr-06	71,03	37,55	6,30
mars-06	18,63	58,48	4,08
avr-06	21,90	83,28	1,15
mai-06	59,03	111,34	2,71
juin-06	6,15	122,14	0,28
juil-06	5,10	138,36	0,35
août-06	0,83	126,33	0,03
sept-06	23,95	96,16	0,52
oct-06	14,30	74,26	0,78
nov-06	13,88	48,33	0,67
déc-06	94,20	34,60	3,31
janv-07	21,03	35,87	2,41
févr-07	42,70	45,58	3,53
mars-07	55,78	55,04	2,46
avr-07	95,05	76,88	5,53
mai-07	6,58	106,71	1,92
juin-07	2,18	120,75	0,08
juil-07	1,55	136,20	0,05
août-07	2,33	127,24	0,01
sept-07	19,28	96,14	0,11
oct-07	79,93	70,84	1,98
nov-07	97,23	43,65	2,97
déc-07	27,55	33,44	2,92
janv-08	35,95	36,64	3,75
févr-08	31,23	44,70	2,38
mars-08	16,23	56,55	1,71
avr-08	9,05	81,75	0,53
mai-08	34,45	104,49	2,11
juin-08	5,98	121,65	0,42
juil-08	7,28	137,02	0,08
août-08	0,43	127,78	0,10
sept-08	45,58	96,27	3,91
oct-08	101,03	71,15	10,95
nov-08	82,20	40,41	9,08
déc-08	150,98	31,46	21,97

janv-09	121,63	34,67	20,55
févr-09	36,13	39,35	25,56
mars-09	33,63	57,38	13,53
avr-09	46,48	75,16	5,10
mai-09	12,28	109,54	2,89
juin-09	2,83	124,68	1,48
juil-09	0,75	138,69	0,99
août-09	1,40	127,41	0,64
sept-09	90,05	94,03	10,26
oct-09	3,00	72,94	2,39
nov-09	29,60	48,82	2,11
déc-09	47,30	38,53	5,66
janv-10	105,63	38,27	3,49
févr-10	63,93	45,51	3,49
mars-10	75,58	57,93	6,76
avr-10	55,50	81,03	3,73
mai-10	20,20	105,53	4,02
juin-10	18,65	120,47	2,05
juil-10	1,40	137,77	1,01
août-10	17,63	128,31	0,33
sept-10	9,75	96,95	0,98
oct-10	67,20	69,89	4,98
nov-10	35,40	43,99	4,60
déc-10	28,83	37,21	6,00
janv-11	38,70	36,71	6,34
févr-11	37,00	38,92	6,42
mars-11	30,75	56,96	3,78
avr-11	55,38	84,48	4,55
mai-11	69,75	109,33	6,04
juin-11	26,18	122,88	3,12
juil-11	3,05	136,14	0,39
août-11	3,88	128,63	0,07
sept-11	6,40	97,28	0,22
oct-11	60,98	71,89	4,30
nov-11	96,38	45,63	8,92
déc-11	42,35	33,47	7,00
janv-12	39,35	31,78	6,33
févr-12	53,03	30,24	4,83
mars-12	31,40	55,07	3,33
avr-12	44,45	75,60	5,47
mai-12	22,93	109,89	2,72
juin-12	1,83	125,61	0,97
juil-12	3,55	136,86	0,38
août-12	1,58	130,18	0,57
sept-12	21,80	96,54	0,72
oct-12	52,85	71,93	2,49

nov-12	153,78	46,56	12,56
déc-12	31,03	35,05	7,26
janv-13	102,88	36,57	39,82
févr-13	60,43	37,63	41,00
mars-13	52,20	57,74	33,50
avr-13	87,98	78,04	23,60
mai-13	48,20	102,75	3,29
juin-13	1,30	118,47	1,57
juil-13	3,00	134,69	0,00
août-13	5,98	127,30	0,00
sept-13	24,75	96,26	4,64
oct-13	7,93	74,56	0,00
nov-13	68,00	42,85	8,68
déc-13	112,43	33,26	20,05
janv-14	81,63	38,25	17,81
févr-14	39,85	42,77	39,18
mars-14	38,15	55,30	33,01
avr-14	8,08	82,70	10,93
mai-14	18,03	108,71	7,46
juin-14	19,03	121,62	5,30
juil-14	0,53	134,54	
août-14	2,08	126,87	
sept-14	37,50	98,27	2,60
oct-14	16,23	74,32	7,41
nov-14	68,85	48,00	12,19
déc-14	96,48	34,44	25,89
janv-15	98,83	35,21	23,90
févr-15	79,05	38,20	32,06
mars-15	39,28	55,96	14,34
avr-15	9,45	82,56	7,29
mai-15	32,53	111,83	6,66
juin-15	11,15	123,34	3,97
juil-15	0,23	139,75	3,36
août-15	6,10	128,72	3,14
sept-15	16,75	95,81	1,76
oct-15	52,15	72,71	7,70
nov-15	25,30	46,71	5,10
déc-15	0,43	38,16	2,85
janv-16	26,48	41,44	4,74
févr-16	64,78	44,91	10,67
mars-16	48,48	55,24	15,53
avr-16	39,68	80,31	19,18
mai-16	35,33	107,31	10,76
juin-16	7,80	123,16	5,52
juil-16	1,08	137,17	5,93
août-16	3,20	128,09	4,74

sept-16	18,40	97,44	5,33
oct-16	12,65	74,87	4,20
nov-16	61,23	45,57	6,20
déc-16	89,48	36,39	10,71
janv-17	151,70	33,51	22,01
févr-17	23,08	46,13	11,41
mars-17	28,03	59,44	10,06
avr-17	11,95	81,19	3,22
mai-17	11,33	112,21	3,48
juin-17	7,93	125,86	3,08
juil-17	0,10	137,91	2,83
août-17	4,90	129,44	3,37
sept-17	9,78	97,04	3,15
oct-17	24,75	73,84	3,66
nov-17	31,00	45,38	2,96
déc-17	63,28	33,26	10,10
janv-18	66,88	37,78	9,92
févr-18	64,08	37,32	9,92
mars-18	113,80	56,59	17,24
avr-18	80,33	79,22	20,06
mai-18	37,13	103,00	12,10
juin-18	24,95	119,71	7,94
juil-18	0,00	135,29	3,35
août-18	2,33	129,19	3,82
sept-18	39,28	98,15	6,79
oct-18	94,83	70,88	15,94
nov-18	56,18	45,16	11,95
déc-18	6,53	37,02	8,99
janv-19	70,18	33,09	11,16
févr-19	22,80	40,11	9,85
mars-19	35,43	57,46	6,18
avr-19	38,60	78,44	8,86
mai-19	10,73	110,18	6,74
juin-19	1,63	122,02	1,93
juil-19	3,55	137,18	2,70
août-19	2,70	129,13	2,18
sept-19	22,18	97,24	1,98
oct-19	41,00	72,14	4,16
nov-19	85,40	44,51	13,07
déc-19	51,08	38,59	10,05
janv-20	32,43	33,82	9,58
févr-20	0,48	46,95	5,46
mars-20	42,03	60,04	7,70
avr-20	88,40	81,44	28,38
mai-20	21,75	111,28	15,12
juin-20	4,95	122,95	5,56

juil-20	1,80	139,61	3,02
août-20	1,98	129,88	2,80
sept-20	3,75	98,01	3,04
oct-20	6,68	70,26	3,21
nov-20	14,35	48,46	3,87
déc-20	94,80	37,25	12,12
janv-21	46,70	38,37	9,84
févr-21	9,80	48,90	5,21
mars-21	47,88	58,03	10,71
avr-21	36,23	81,91	11,06
mai-21	15,80	110,93	7,18
juin-21	8,98	122,36	4,57
juil-21	1,13	139,22	2,14
août-21	2,00	128,94	1,85
sept-21	11,53	98,60	2,24
oct-21	3,03	72,00	2,44
nov-21	54,53	42,32	5,42
déc-21	29,33	37,23	8,06
janv-22	26,40	35,29	7,64
févr-22	6,40	44,77	3,92
mars-22	105,00	57,86	22,48
avr-22	46,80	76,75	13,27
mai-22	34,00	112,40	11,85
juin-22	8,68	125,83	2,84
juil-22	1,15	138,82	2,99
août-22	1,65	129,88	1,77
sept-22	7,15	98,17	1,00
oct-22	14,20	77,18	2,49
nov-22	21,40	50,07	4,81
déc-22	30,63	41,98	7,33
janv-23	72,50	35,53	9,97
févr-23	43,80	42,46	9,34
mars-23	6,98	62,28	5,14
avr-23	1,93	87,80	3,60
mai-23	22,63	108,78	3,31
juin-23	19,35	124,81	3,86
juil-23	0,68	141,52	2,11
août-23	0,80	130,28	1,00