

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
بلحاج بوشعيب جامعة عين تموشنت
Université–AinTemouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département HYDRAULIQUE



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en HYDRAULIQUE
Domaine : HYDRAULIQUE
Filière : HYDRAULIQUE URBAINE
Spécialité : HYDRAULIQUE URBAINE
Thème

**Analyse fréquentielle et modélisation statistique des
crues cas du bassin versant « Isser Sekkak »**

Présenté Par :

Melle : Belhaded Chahrazed

Melle : Bouazza Chaimaa

Devant le jury composé de :

Bentahar Kheira

Président
Examineur
Encadrant

UAT.BB (MCB)
UAT.BB (MCB)
UAT.BB (MCB)

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

*Nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir permis
d'accomplir ce travail.*

*Nous présentons également à cette occasion nos chaleureux remerciements à
notre encadrante Madame BENTAHAR Kheira, pour sa patience, et surtout
pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa
bienveillance. Qu'elle trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude.*

*Nous remercions enfin tous les enseignants du département d'hydraulique, pour
leurs enseignements de qualité et leurs conseils qui nous ont permis de
poursuivre notre itinéraire académique jusqu'à présent.*

*Enfin, nos sincères remerciements à nos familles, nos amis et toutes les
personnes qui nous ont soutenus tout au long de ce parcours.*

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail à :

Mes chers parents : Abdelkader et Fatima, sources inépuisables d'amour, de sagesse et de prières.

Que Dieu vous protège, et vous récompense pour tout ce que vous avez fait pour moi.

A mon cher frère Briek,

A mes chères sœurs Soumia et Amel,

Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma chère grand-mère,

Qui je les souhaite une bonne santé,

A toute ma famille,

A l'ami de l'âme Houcin

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment, et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de mon travail.

,Constante à mes côtés.

Une dédicace toute particulière à Madame Bentahar Kheira pour sa bienveillance, son accompagnement précieux, et ses conseils

Que Dieu récompense chacun de vous pour le rôle que vous avez joué dans l'aboutissement de ce travail.

Belhadeh Chahrazed

Dédicace

Avant tout, Je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la Patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire à :

La mémoire de mon cher père, Ahmed :

Qu'Allah lui fasse miséricorde, Son amour, Ses sacrifices et ses précieux Conseils resteront à jamais gravés dans mon cœur. Puisse Allah l'accueillir dans Son vaste Paradis.

À ma très chère mère, Fatima :

Pour son amour infini, ses prières, son soutien et les sacrifices qu'elle a Consentis pour ma réussite.

À mes chers frères, Youssef et Mohamed :

Pour leur soutien, leur encouragement et leur présence à mes côtés.

*À mes grands- parents : pour leur affection,
Leurs bénédictions et leurs précieux conseils.*

A toute ma famille, pour leur soutien moral et leurs encouragements

À mon encadrante, Docteure Bentahar Kheira :

Pour sa disponibilité, ses conseils avisés. Son accompagnement et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

A tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Bouazza Chaima

Résumé

Les crues constituent l'un des phénomènes hydrologiques les plus importants en raison de leurs impacts sur les populations, les infrastructures et l'environnement. La connaissance des débits extrêmes est essentielle pour la conception des ouvrages hydrauliques et la gestion du risque d'inondation. Dans ce contexte, ce travail porte sur l'analyse fréquentielle et la modélisation statistique des crues dans le bassin versant de l'oued Isser sikkak à partir des données hydrométriques disponibles.

L'étude a consisté à analyser une série de pluie maximale journalière afin d'évaluer ses caractéristiques statistiques et sa qualité. Plusieurs lois de probabilité ont été ajustées aux données observées, notamment la loi de Gumbel et la loi log-normale. La qualité de l'ajustement a été évaluée à l'aide des critères AIC et BIC ainsi que des tests statistiques de Khi-deux et de Kolmogorov-Smirnov, en utilisant les logiciels Hyfran Plus et Hydrognomon.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier la loi de probabilité la plus appropriée pour représenter le comportement des pluies du bassin étudié. Par la suite, l'analyse des précipitations de courte durée a permis de construire les courbes (IDF).

L'interprétation des résultats démontre que la méthode de Sokolovsky est la plus appropriée pour estimer les débits max du bassin de l'Oued Isser sikkak correspondant à différentes périodes de retour, telles que 10, 20, 50 et 100 ans. Ces estimations constituent des informations essentielles pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et l'évaluation du risque d'inondation.

Enfin, cette étude met en évidence l'intérêt de l'analyse fréquentielle comme outil d'aide à la décision dans le domaine de l'hydrologie. Les résultats obtenus pourraient être valorisés dans des travaux futurs de modélisation hydraulique et de cartographie des zones inondables.

Mots clés :

Crue, Débit, Analyse fréquentielle, Période de retour, Pluie, Inondation

Abstract

Floods are one of the most significant hydrological phenomena due to their impacts on populations, infrastructure, and the environment. The knowledge of extreme flows is essential for the design of hydraulic structures and the management of flood risk. In this context, this work focuses on the frequency analysis and statistical modeling of floods in the Isser Sikkak watershed based on the available hydrometric data.

The study consisted of analyzing a series of daily maximum rainfall to evaluate its statistical characteristics and quality. Several probability distributions were fitted to the observed data, including the Gumbel distribution and the log-normal distribution. The quality of the fit was evaluated using the AIC and BIC criteria as well as the Chi-squared and Kolmogorov-Smirnov statistical tests, using the Hyfran Plus and Hydrognomon software.

The results obtained allowed for the identification of the most appropriate probability law to represent the behavior of the rainfall in the studied basin. Subsequently, the analysis of short-duration precipitation allowed for the construction of the IDF curves. The interpretation of the results shows that the Sokolovsky method is the most appropriate for estimating the maximum flows of the Oued Isser sikkak basin corresponding to different return periods, such as 10, 20, 50, and 100 years. These estimates provide essential information for the design of hydraulic structures and the assessment of flood risk. Finally, this study highlights the value of frequency analysis as a decision-making tool in the field of hydrology. The results obtained could be utilized in future work on hydraulic modeling and flood zone mapping.

Keywords:

Flood, Flow rate, Frequency analysis, Return period, Rainfall, Flooding

ملخص

تشكل الفيضانات واحدة من أهم الظواهر الهيدرولوجية نظرًا لتأثيراتها على السكان والبنية التحتية والبيئة. معرفة التدفقات القصوى ضرورية لتصميم المنشآت الهيدروليكية وإدارة مخاطر الفيضانات. في هذا السياق، يتناول هذا العمل التحليل التكراري والنمذجة الإحصائية للفيضانات في حوض وادي إيسر سيكك استنادًا إلى البيانات الهيدرومترية المتاحة. تضمنت الدراسة تحليل سلسلة من الأمطار القصوى اليومية بهدف تقييم خصائصها الإحصائية وجودتها. تم تعديل عدة قوانين احتمالية على البيانات الملاحظة، بما في ذلك قانون غامبل والقانون اللوغاريتمي الطبيعي. تم تقييم جودة التوافق باستخدام معايير AIC و BIC بالإضافة إلى الاختبارات الإحصائية Khi-deux و Kolmogorov-Smirnov، باستخدام البرامج Hydrognomon و Hyfran Plus.

النتائج التي تم الحصول عليها سمحت بتحديد قانون الاحتمال الأكثر ملاءمة لتمثيل سلوك الأمطار في الحوض المدروس. بعد ذلك، سمحت تحليل الأمطار القصيرة المدة ببناء المنحنيات (IDF) تُظهر تفسير النتائج أن طريقة سوكولوفسكي هي الأكثر ملاءمة لتقدير التدفقات القصوى لحوض وادي إيسر سيكك التي تتوافق مع فترات العودة المختلفة، مثل 10، 20، 50 و 100 سنة. تشكل هذه التقديرات معلومات أساسية لتصميم المنشآت الهيدروليكية وتقييم خطر الفيضانات.

أخيرًا، تُبرز هذه الدراسة أهمية التحليل الترددي كأداة مساعدة في اتخاذ القرار في مجال الهيدرولوجيا. يمكن الاستفادة من النتائج التي تم الحصول عليها في الأعمال المستقبلية لنمذجة الهيدروليكية ورسم خرائط المناطق المعرضة للفيضانات.

الكلمات المفتاحية:

فيضانات، تدفق، تحليل ترددي، فترة العودة، مطر، فيضان

Table des matières

Chapitre I : Généralité sur les crues et l'analyse fréquentielle

Introduction.....	1
I.1 Introduction	3
I.1 Crues et processus de génération des crues.....	3
I.2 Définition d'une crue	3
I.3 Intérêt de l'étude des crues	4
I.4 description de crue	5
I.4.1Éléments descriptifs d'une crue	5
I.4.2 Caractéristiques des crues	7
I.5 Type des crues	9
I.6 Genèse des crues.....	10
I.6.1Les processus responsables de formation des crues	10
I.6.1.1Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau	11
I.6.1.2 Ecoulement de surface	11
I.6.1.3 Ecoulement sub-surface	12
I.6.2 Les facteurs générateurs des crues.....	14
I.7 Analyse hydrologique des crues.....	14
I.7.1 Les facteurs qui influent sur la forme de l'hydrogramme	14
I.8 Analyse fréquentielle.....	16
I.8.1. Echantillonnage	16
I.8.2 Test hypothèse	16
I.8.3Tests d'homogénéité	16
I.8.4 Test d'indépendance	17
I.8.5 Test de Stationnarité	17
I.8.6 Choix du modèle d'ajustement	18

I.9 Conclusion	19
-----------------------------	-----------

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique de la zone d'étude	20
II.2 Morphométries du bassin.....	21
II.2.1 Caractéristiques morphométriques du bassin versant.....	21
II.2.1.1 Caractéristiques de forme	21
II.2.1.2. Caractéristiques de relief	24
II.3 Etude du réseau hydrographique.....	26
II.3.1 Densité de drainage	27
II.3.2 Rapport de confluence	27
II.3.3 Rapport des longueurs	28
II.3.4 Hauteurs caractéristiques	28
II.3.5. Indices de pente et relief	29
II.4 La géologie du bassin.....	34
II.4.1 Le secondaire.....	34
II.4.2 Le tertiaire	35
II.4.3 Le quaternaire.....	36
II.5 L'occupation du sol	37
II.6 Conclusion.....	38

Chapitre III : Analyse des pluies

III.1 Introduction	39
III.2 Etude des précipitations.....	39
III.3 Variation interannuelle de la pluviométrie :	42
III.4 Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles :.....	43
III.5 Hypothèse de l'analyse fréquentielle	46
III.5.1 Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz.....	46
III.5.2 Test de MANN – KENDALL	47

III.6 Vérification des hypothèses de base pour les précipitations Journalières maximales par le logiciel Hyfran Plus :	48
III.6.1 Test de Wald-Wolfowitz et Mann Kendall.....	48
III.6 .2 Test d'ajustement par les critères Aic. Bic	49
III.7 Vérification de la qualité d'ajustement des lois statistiques par logiciel Hydrognomon	50
III.7.1 TEST DE KHI DEUX.....	50
III.7.2 Test de Kolmogorov.....	51
III.8 Ajustement des pluies maximales journalières	54
III.8.1 Comparaison Graphique	54
III.8.2 Ajustement de la pluie maximale à la loi de probabilité de Gumbel	56
III.9 Précipitations de courte durée	58
III.9.1 Les courbes IDF :	61
III.10 Conclusion	64
 Chapitre IV : Estimation des débits de crue au moyen de méthodes empiriques	
IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Estimation du débit maximum d'une crue	65
IV.3 Les méthodes empiriques utilisées	66
IV.3.1 Formule de Sokolovsky (1958-1968).....	66
IV.3.2 Formule de Giandotti	66
IV.3.3 Formule de Turazza.....	67
IV.3.4 Formule Possenti.....	67
a. Débits maximums fréquentiels.....	68
IV.4 L'hydrogramme de crue	74
IV.4.1 Construction des hydrogrammes des crues (SOKOLOVSKY).....	74
IV.4.2 Calcul de volume de la crue :	80
IV.5 Conclusion	80

Conclusion générale.....	82
Liste des références.....	83

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les crues et l'analyse fréquentielle

Figure I.1: Caractéristiques d'un hydrogramme de crue	6
Figure I.2: Cheminement possible de l'eau sur un versant (ambroise.1998).....	10
Figure I.3: Ecoulement Hortornien	11
Figure I.4: Ruissellement par saturation et exfiltration (Ward et Robinson.1990).....	12
Figure I.5: Ecoulement souterrain.....	13

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1: Situation géographique de la zone d'étude.....	20
Figure II.2: Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp.1979).....	22
Figure II.3: L'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion du bassin versant	25
Figure II.4: Courbe hypsométrique et histogramme de fréquences altimétriques du bassin versant d'Isser Sikkak	26
Figure II.5: Carte hypsométrique du bassin versant du Isser Sikkak	26
Figure II.6: Réseau hydrographique bassin versant Isser Sikkak	27
Figure II.7: Carte des pentes sous bassin Isser Sikkak	30
Figure II.8: Carte d'occupation du sol bassin versant Isser Sikkak	38

Chapitre III : Analyse des pluies

Figure III.1: Localisation des stations pluviométriques de bassin versant Isser Sikkak	40
Figure III. 2: Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Lalla Setti et Bensakrane	41
Figure III. 3: Régression linéaire entre les pluies annuelle des stations de LOalla Setti et Tlemcen	41
Figure III.4: Précipitation moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'oued Isser Sikkak.....	43

Figure III.5: Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station Lalla Setti	44
Figure III. 6: Variation interannuelle des précipitations annuelles de station Bensakrane.....	45
Figure III.7: Variation interannuelle des précipitations annuelles de station Tlemcen	45
Figure III.8: Ajustement comparatif des trois lois de la station Lalla setti.....	55
Figure III.9: Ajustement comparatif des trois de la station Tlemcen	55
Figure III.10: Ajustement comparatif des trois lois de la station Bensakrane	56
Figure III.11: Ajustement à loi de Gumbel de la station Lalla setti	56
Figure III.12: Ajustement à la loi Gumbel de la station Tlemcen	57
Figure III.13: Ajustement à la loi de Gumbel de la station Bensakrane	57
Figure III.14: Courbe des pluies à courte durée de la station Lalla Setti.....	61
Figure III.15: Courbe IDF de la station Lalla Setti.....	62
Figure III.16: Courbe des pluies à courte durée de la station Tlemcen	62
Figure III.17: Courbe IDF de la station Tlemcen	63
Figure III.18: Courbe des pluies à courte durée de la station Bensakrane.....	63
Figure III.19: Courbe IDF de la station Bensakrane.....	64

Chapitre IV : Estimation des débits de crue au moyen de méthodes empiriques

Figure IV.1: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Lalla Setti ...	72
Figure IV.2: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Tlemcen.....	73
Figure IV.3: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Bensakrane .	73
Figure IV.4: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station Lalla setti	76
Figure IV.5: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station Tlemcen	78
Figure IV.6: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station Bensakrane	79

Liste des Tableaux

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1: Caractéristique de forme bassin versant Isser Sikkak	23
Tableau II.2: Répartition hypsométrique du bassin versant Isser Sikkak	25
Tableau II.3: Paramètres morpho métriques des principales unités hydrologiques de la tafna	28
Tableau 4: Les altitudes caractéristiques des sous bassins	29
Tableau II.5: Indices de pentes et reliefs des sous bassins Isser Sikkak	31
Tableau II.6: La classification d'O.R.S.T.O.M. (1) selon Ds	32
Tableau II.7: Valeurs des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations des eaux des sous bassins	33
Tableau 8: Récapitulatif de bassin versant se Isser Sikkak	33

Chapitre III : Analyse des pluies

Tableau III.1: Caractéristiques des stations pluviométriques	39
Tableau III 2: Paramètres de corrélation entre deux différentes stations avec celle Lalla Setti	42
Tableau III 3: Caractéristiques de la précipitation annuelle des stations pluviométriques du bassin de l'oued Isser Sikkak.....	42
Tableau III.4: Paramètres statiques des pluies de bassin.....	44
Tableau III.5: Résultats des test statiques appliqués aux précipitations journalières maximales du bassin versant Isser Sikkak	48
Tableau III.6: Comparaison critères Aic. Bic	50
Tableau III.7: Résultats de test khi deux X^2 des stations.....	52
Tableau III 8: Résultats de test Kolmogorov des stations	52
Tableau III.9: Les paramètres statiques des pluies maximales journalières	54
Tableau III.10: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station Lalla Setti	58
Tableau III.11: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station Tlemcen	58
Tableau III.12: Caratéristique de la pluie journalière maximale de la station Bensakrane	58

Tableau III.13: Exposant climatique de la station du bassin Isser sikka	59
Tableau III.14: Hauteur intensité durée fréquence de la station Lalla Setti.....	59
Tableau III.15: Hauteur intensité durée fréquence de la station Tlemcen	60
Tableau III.16: Hauteur intensité durée fréquence de la station Bensakrane	60

Chapitre IV : Estimation des débits de crue au moyen de méthodes empiriques

Tableau IV.1: Pluie maximale pendant le temp de concentration	68
Tableau IV.2: Intensité de pluie pour une durée égale à T_c	69
Tableau IV.3: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode et Turazza).69	
Tableau IV.4: Débits maximums pour différentes périodes de retour (méthode de Giandotti)	70
Tableau IV.5: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode de Sokolovsky)	70
Tableau IV.6: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode de Poosenti)	71
Tableau IV.7: Débits maximums pour les quatre formules	71
Tableau IV.8: Récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue	75
Tableau IV.9: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour de station Lalla Setti.....	75
Tableau IV.10: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station Lalla Setti.....	76
Tableau IV.11: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour de station Tlemcen	77
Tableau IV.12: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station de Tlemcen	77
Tableau IV.13: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour station de Bensakrane	78
Tableau IV.14: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station Bensakrane	79
Tableau IV.15: Volume de crue des trois stations	80

Introduction

La crue est une augmentation rapide du débit d'un cours d'eau, entraînant la submersion de terrains normalement émergés. Cet événement hydrologique extrême constitue l'un des risques naturels les plus courants.

L'inondation fait partie des phénomènes hydrologiques extrêmes étant haute eaux (inondation) (Yakho Bakhta, 2022). L'étude des crues revêt une grande importance, comparable à d'autres risques naturels tels que les séismes, ouragans et éruptions volcaniques. Ces phénomènes naturels peuvent causer des dommages humains et matériels conséquents. Pour prévenir de tels dégâts, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre, incluant la construction de barrages, la déviation des cours d'eau, le renforcement des infrastructures à protéger, et le déplacement des enjeux menacés hors des zones à risque. (Sounef, Nasima)

L'analyse fréquentielle des précipitations maximales journalières ou annuelles constitue un outil fondamental pour quantifier le risque pluviométrique et prévoir la récurrence de ces événements extrêmes. Elle repose sur des lois statistiques telles que Gumbel, Log-normale et GEV ou encore la loi Normale et Weibull, largement utilisées pour modéliser les distributions de pluies extrêmes dans les contextes hydrologiques complexes (GUMBEL, 1958 ; BENKHALED, 2014). Plusieurs travaux réalisés en Algérie (MEDDI et ; ZAHAR et al., 2007 ; ... etc.) ont démontré l'importance de l'ajustement rigoureux de ces lois aux séries chronologiques pluviométriques pour établir des hauteurs de pluie de période de retour donnée, essentielles à la conception des ouvrages hydrauliques (barrages, canalisations, digues, etc.) et à la prévention des risques.

Dans cette étude, nous nous intéressons au bassin versant de l'Oued IsserSikkak, à travers les données annuelles et journalières maximales de trois stations pluviométriques représentatives.

L'objectif principal de cette étude a été d'analyser les séries des pluies maximales observées, de vérifier leur validité statistique à travers différents tests, puis d'appliquer plusieurs lois de distribution afin d'identifier celle qui représente le mieux les données étudiées. Cette démarche a permis d'estimer les débits de projet correspondant à différentes périodes de retour à l'aide de plusieurs formules empiriques.

Notre travail est structuré en quatre chapitres :

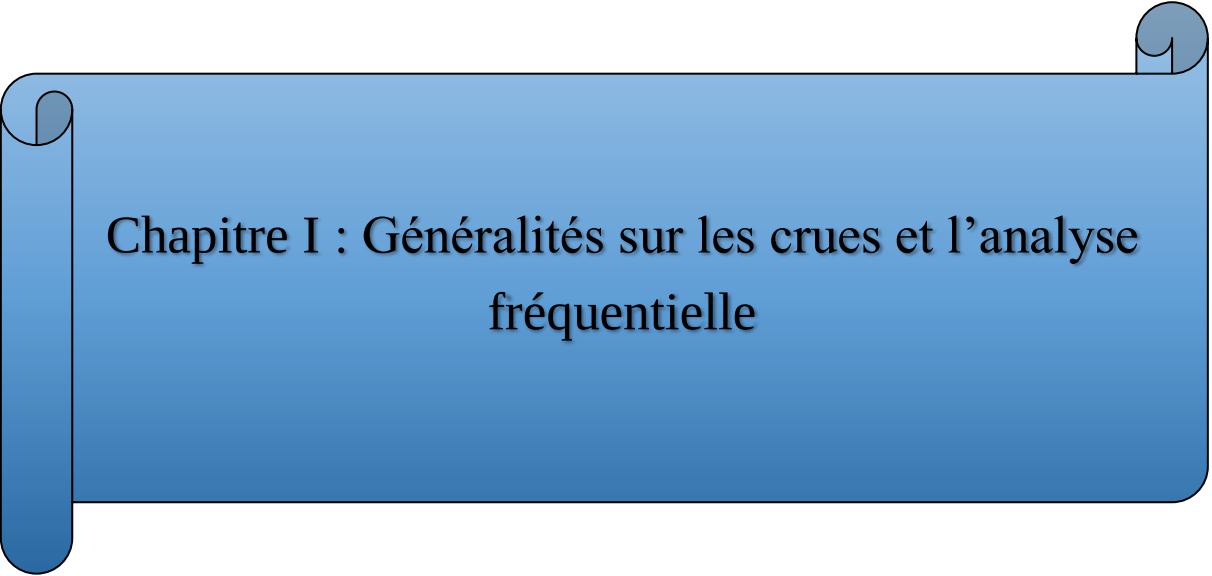
Dans le premier chapitre : présent une synthèse bibliographique sur généralité des crues et analyse fréquentielle.

Le deuxième chapitre : porte sur la présentation zone d'étude du sous bassin versant de Isser Sikkak.

Le troisième chapitre : s'intéresse à l'analyse fréquentielle des précipitations des trois stations pluviométriques dans le bassin versant de l'Oued IsserSikkak.

Le quatrième chapitre : consacre à L'estimation des débits de crue au moyen de méthodes empiriques,

Enfin, nous terminons le présent travail par une conclusion.



Chapitre I : Généralités sur les crues et l'analyse fréquentielle

I.1 Introduction

L'intérêt de l'étude des crues provient du pouvoir dévastateur de celles-ci quand elles sont importantes. Afin de s'en prémunir il est utile de bien les analyser connaître leurs origines. Les différents événements qui les provoquent et les processus participant à leur constitution. Plusieurs événements peuvent être responsables de la genèse de ces crues dont les plus connues sont la présence de fortes intensités de pluies ou des pluies prolongées ainsi que les ruptures de digues de barrages ... etc.

Dans les régions arides l'étude des débits de crues est de très grande importance de fait que les ressources hydriques sont vulnérables et les crues sont généralement rares mais souvent catastrophiques. La formation d'une crue provient de deux phénomènes successifs : la précipitation puis le transfert de ces précipitations de l'ensemble de bassin versant vers les réseaux hydrographiques par différents processus hydrologiques. Mais avant de parler des mécanismes et les processus de formation de crue, il est nécessaire de savoir c'est quoi une crue.

Nous consacrerons cette partie du travail sur l'état des connaissances concernant les crues, leurs caractéristiques leurs origines les différents processus participants à leur genèse, les différents facteurs influençant leur apparition et Analyse fréquentielle des crues.

I.1 Crues et processus de génération des crues

Selon ROCHE (1963) le concept de crue est associé à celui du temps de concentration des eaux de pluie dans un bassin. Il est assez facile de visualiser comment une inondation peut se produire à partir des précipitations. La réduction des précipitations sporadiques signifie que la quantité de pluie disponible pour l'apparition d'une inondation à fréquence spécifique est moins probable sur un vaste bassin qu'un petit ce qui a pour effet de réduire non seulement le débit spécifique maximal mais également la quantité d'eau qui ruisselle.

Avant de poursuivre définissons ce qu'est une inondation. D'où vient-elle ? Comment la définir ?

I.2 Définition d'une crue

Une crue est une période de niveau d'eau élevé dans un bassin hydrographique dont la durée est variable et qui s'accompagne généralement de précipitations d'intensité variable.

Étymologiquement une crue désigne une quantité d'eau « anormale » transportée par un système hydraulique (lac ou cours d'eau) avec ou sans débordement. (Benzineb Khadija.2017)

La crue est simple si elle présente une seule pointe et complexe si elle présente plusieurs pointes. La crue doit être distinguée de l'inondation. L'inondation correspond au débordement des eaux hors du lit mineur en rivière ou des berges d'un lac. Une crue ne conduit pas nécessairement à une inondation (Ali Hachemi.2017)

Pour caractériser un épisode de crue il existe un grand nombre de variables-clefs dont les valeurs conditionnent la sévérité des crues :

1. Le débit de pointe de crue Q_p (m^3/s)
2. La durée caractéristique D durant laquelle le débit reste supérieur à $Q_p/2$
3. le volume V ruisselé
4. La vitesse d'écoulement (m/s)
5. La fréquence d'apparition.

La transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions nommées respectivement fonction ou fonction d'infiltration et fonction de transfert.

- ✓ La fonction de la production permet de déterminer le hyétogramme de pluie nette à partir de la pluie brute.
- ✓ La fonction de transfert permet quant à elle de déterminer l'hydrogramme de crue résultante de la pluie nette.
- ✓ La pluie nette est la fraction de pluies brute participant totalement l'écoulement. (Houichi Larbi)

1.3 Intérêt de l'étude des crues

Considérées comme véritable un fléau (Bois. 2000) elles doivent donc bien être connues pour : (Musy. 1999)

- La gestion du système hydraulique en amont (le cours d'eau ses affluents et exutoires les lacs naturels ou de pays les mares, les dépressions)

- La gestion des systèmes environnants à la dépendance du cours d'eau en question (alimentation des ressources en eau et recharge des nappes en particulier)
- La gestion des bassins versants départements de la crue
- La gestion du risque hydrologique associatif aux crues (inondation). (Souanef Nassima.2015)

I.4 description de crue

I.4.1Éléments descriptifs d'une crue

Une crue est généralement représentée graphiquement par un hydrogramme qui représente les variations des débits instantanés en fonction du temps. Un hydrogramme de crue n'est pas uniquement caractérisé par la valeur de son débit de pointe mais aussi par la valeur de son volume de pointe (partie sombre de l'hydrogramme) et par sa durée.

Une crue est décrite par quatre éléments (Figure1)

- Temps de concentration : temps mis par la goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin pour atteindre le point de sortie ;
- Pointe de crue : intensité de la crue et durée de la période critique ;
- Courbe de tarissement de la rivière au niveau de la période précédant la crue ;
- Fréquence de retour : pour une crue centennale elle a lieu en moyenne à chaque année soit une chance un sur cent (1/100) de se produire (Ben Amor. 2010).
- Le temps de montée : lui-même générateur des gradients de montée horaires les plus forts - a été extrait après classification des types de montée de crue. Une classification en dix types de montée permet d'en faire une synthèse sur la plupart des cas
- Temps de la décrue : niveau des eaux de bassin (après une crue). (Yakhou Bakhta.2022)

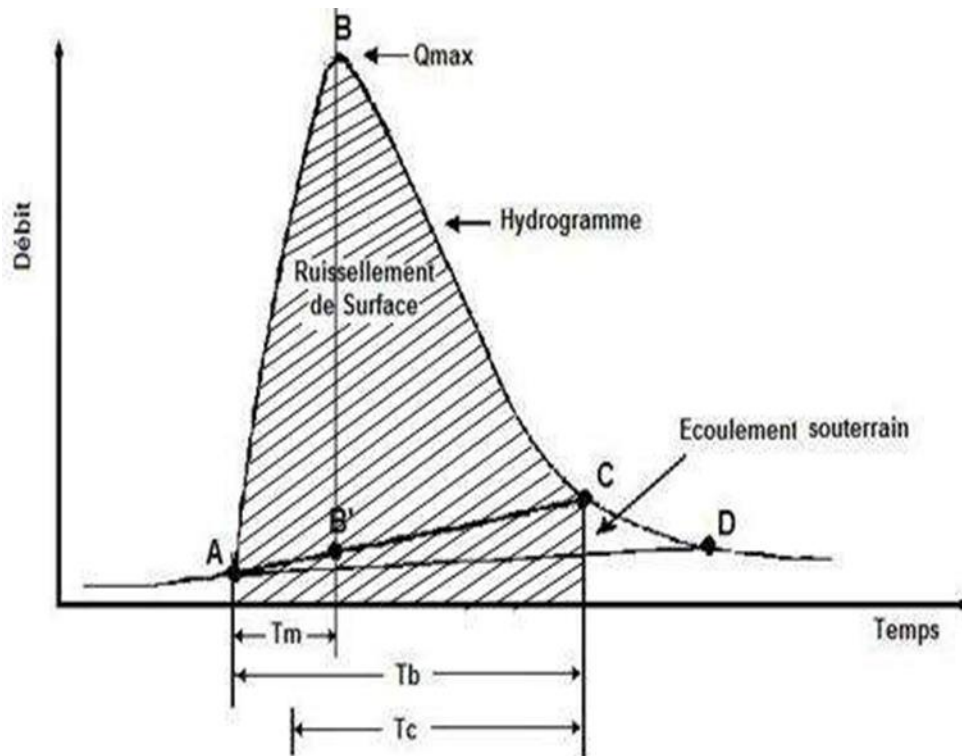


Figure I.1:Caractéristiques d'un hydrogramme de crue

Où :

Q_{max} : est le débit de pointe

T_m : est le temps de montée de la crue

T_b : est le temps de base

T_c : est le temps de concentration

A-B : est la courbe de montée de la crue

B-C : est la courbe de décrue

C-D : est la courbe de tarissement

La surface hachurée représente le volume de la crue.

A l'échelle annuelle, il existerait trois types d'hydrogramme Kouider (2009).

Hydrogramme de type 1 : ce hydrogramme est caractérisé par une seule pointe annuelle nette

Hydrogramme de type 2 : ce hydrogramme est caractérisé par deux pointes annuelles nettes

Hydrogramme de type 3 : c'est un type complexe d'hydrogramme. ou en observant plusieurs pointes annuelles nettes.

I.4.2 Caractéristiques des crues

En matière de gestion la crue n'atteint son caractère gênant qu'en fonction de sa capacité à interférer avec les activités humaines ce qui va dépendre du montant des pertes économiques effectivement ou potentiellement subies et du risque qu'elle représente pour la vie humaine. La gravité d'une crue pour un tronçon de rivière donné et pour un usage donné des terres riveraines dépend de sa "portée". (Yakhou Bakhta.2022)

a. Hauteur de crue

La hauteur de crue est la hauteur d'eau atteint au maximum lors de la crue. Théoriquement c'est le paramètre le plus important car c'est lui qui conditionne le débordement. Hydrologiquement elle n'est pas la plus pertinente pour apprécier la crue car elle diffère d'un point à l'autre elle caractérise donc une Section transversale donnée et non l'onde de crue se propageant le long du cours. De Plus la hauteur est parfois le meilleur critère de la gravité de la crue. Une crue engendrée par un orage d'été peut être assez haute mais dure souvent un temps court et correspond à un faible volume. L'inondation n'occasionne donc pas forcément beaucoup de dégâts car elle ne met en cause qu'une faible quantité d'eau et les sols ne sont sous l'eau que peu de temps. (Merah Bouchera.2021)

b. Débit de pointe de la crue

La valeur maximale instantanée du débit pendant la crue s'appelle souvent le débit de pointe ; elle a l'avantage d'être une caractéristique hydrologique facilement accessible puisqu'elle se rapporte simplement à l'onde de crue elle-même indépendamment d'une section transversale particulière du cours d'eau, même si elle peut changer au fur et à mesure que la crue descend le cours d'eau (elle n'est pas fixe). Ce débit de pointe de crue se démarque de

la hauteur de crue et n'est pas particulièrement sensible aux variations locales du lit du cours d'eau (érosion, sédimentation). (Chetioui Saida.2019)

Il s'agit donc d'un paramètre d'intérêt bien plus pertinent au cours d'une crue tant pour la crue elle-même que pour toute section transversale. En effet le débit de pointe coïncide bien souvent et ce n'est pas un mal avec le moment où l'eau atteint son maximum ce qui procure de bonnes indications de hauteur. Ce débit de pointe est atteint en réalité juste en amont du maximum, mais dans la plupart des cas la différence entre ce maximum et le débit de pointe est négligeable ((Javelle 2001)).

c. Le volume de la crue

Le volume de la crue à savoir le volume d'eau ayant transité par le système au cours de toute la période de la crue constitue une caractéristique indispensable chaque fois que la nature des dommages résulte de la quantité d'eau qui inonde ou pour les interventions visant à réduire le débit de pointe. (Chetioui Saida.2019)

d. Durées relatives à un seul événement de crue

La durée est une notion sans laquelle la description du régime de crues devient impossible. C'est pourquoi de nombreuses durées ont été repérées par des hydrologues. Les temps caractéristiques définis ci-dessous sont tous relatifs à l'événement de crue, il ne s'agit donc pas de valeurs calculables avec précision mais d'ordres de grandeurs liés à la définition qui n'est guère plus qu'une représentation très simplifiée de la transformation pluie-débit (sachant que les écoulements sont pour la plupart supposés totalement exagérer les ruissellements). Les définitions ci-après sont celles de Roche (1963) reprises par (Javelle. 2001).

- ✓ Temps de réponse du bassin versant t_p (ou « latence ») : Représente le délai entre la courbe de débit à l'exutoire du bassin versant et la courbe de débit des eaux pluviales.
- ✓ Temps de confluence t_c : Temps nécessaire aux gouttes de pluie pour parcourir la distance entre leur point le plus éloigné (d'un point de vue hydrologique) et l'exutoire. t_c peut être estimé en mesurant le temps écoulé entre la fin des précipitations nettes et la fin du ruissellement direct (c'est-à-dire la fin du ruissellement de surface).
- ✓ Temps de montée t_m : Intervalle de temps entre l'arrivée du débit rapide à l'exutoire (détectable par un limnimètre) et la valeur maximale de la courbe de débit due au ruissellement de surface.

- ✓ Temps de base t_b : Durée du ruissellement direct c'est-à-dire la longueur de l'axe horizontal du temps de base de la courbe de débit due au ruissellement de surface. (Madi Meriem.2012)

e. Période de retour

Un phénomène qui a une période de retour d'un siècle (souvent noté centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé par an à condition de le considérer sur une très longue période. Mais sur de courtes périodes (quelques années parfois une). Il peut bien se produire plusieurs fois. Dire qu'un individu a une chance sur cinq d'avoir vécu la crue centennale en vingt ans. (Kalbaza Mourad.2016)

I.5 Type des crues

La typologie la plus simple et la plus classique distingue les crues rapides et les crues lentes.

- ✓ **Les crues rapides** : Cela se produit généralement après de fortes pluies et son impact est limité. Pour les riverains la conséquence la plus importante est une montée rapide du niveau de l'eau
- ✓ **Les crues lentes** : Il s'agit de grands bassins versants qui sont rarement soumis intégralement et simultanément à des épisodes pluvieux. Les mouvements des grandes masses d'air entraînent le plus souvent des pluies longues mais d'intensité modérée et sur de grandes étendues. Ce sont là des causes de crues lentes ; au contraire des épisodes convectifs de plus faible étendue que les précédents entraînent des crues très rapides (Degoutte. 2012). La typologie ici proposée est d'une simplicité du fait qu'elle repose uniquement sur la forme de l'hydrogramme de crue pointu ou étalé. Pour aller plus en avant, il faut prendre en compte ce qui fait l'essence de l'événement. Ce n'est plus la pluie cet événement mais la crue aboutissement de la transformation de la pluie en débit par le bassin versant. En l'énonçant sous la forme de crue de plaine ou torrentielle, on a bien l'impression de mettre en cause l'espace atteint par la crue donc de le rendre plus complexe alors que ce n'est que de crue qu'il s'agit ici. Tout ceci décline les subtilités d'une classification qui n'a pas connu d'application universelle à l'économie de la réglementation de l'eau. (Harik Meriem.2021)
- ✓ **Les crues éclairs** : Les crues éclair résultent de violentes averses orageuses. Typiques des petits bassins versants de quelques km^2 à relief mouvementé ces inondations sont

aussi brutales (les eaux montent de plusieurs décimètres par heure), qu'éphémères (elles durent quelques heures ou quelques jours). Le bassin versant de la région méditerranéenne et des zones de montagne subit souvent ce type de crue.

L'intensité des précipitations est extrêmement élevée, saturant rapidement le sol et l'empêchant d'absorber davantage d'eau. (Bouchelkia Hamid)

I.6 Genèse des crues

I.6.1 Les processus responsables de formation des crues

Les inondations résultent de plusieurs processus simultanés dont la contribution varie selon les diverses conditions observées sur le terrain.

Cela consiste à examiner les divers éléments contribuant à la création et à l'accroissement temporaire des flux d'un cours d'eau.

- Les précipitations directes à la surface de l'eau ("direct précipitation")
- Les écoulements de surface ("Overland flow")
- Les écoulements de proche subsurface ("throughflow")

Les écoulements souterrains ("Groundwater flow") (Benzineb Khadidja.2017)

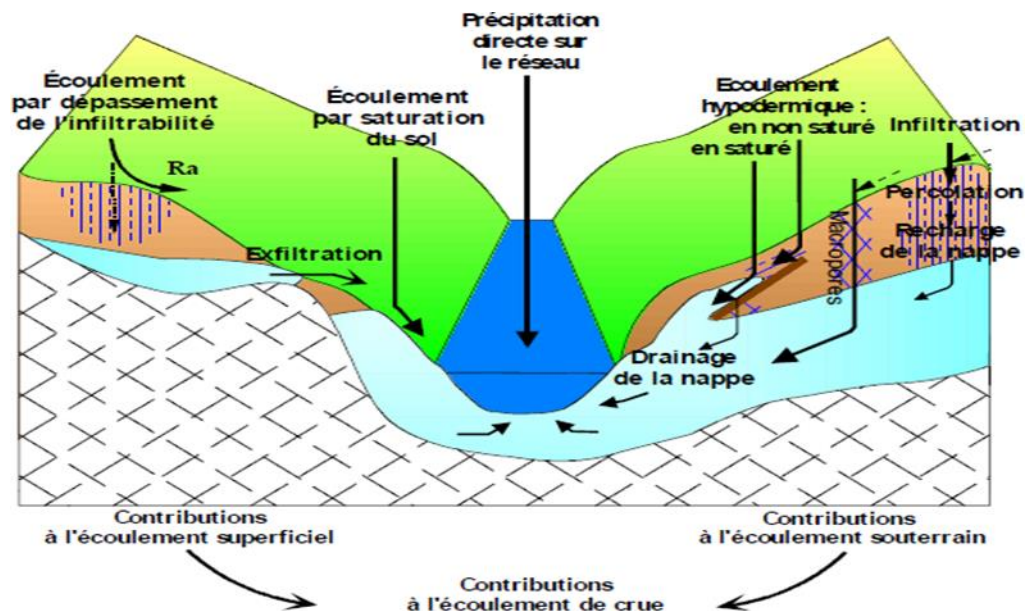


Figure I.2: Cheminement possible de l'eau sur un versant (ambroise.1998)

I.6.1.1 Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau

Type de processus est souvent secondaire car de l'ordre du pour-cent mille à deux la surface occupée par les cours d'eau permanents ne constitue qu'une marginale fraction de la surface totale du versant. Dans le cas où le bassin versant manifeste un important réseau hydrologique à la suite de précipitations de longues durées ou à la présence de larges zones lacustres ou marécageuses la part relative de l'efficacité des précipitations directes croît. Les précipitations directes peuvent notamment être considérées comme des précipitations à tomber sur des surfaces déjà saturées. (Benzineb Khadidja.2017)

I.6.1.2 Ecoulement de surface

I.6.1.2.1 Ecoulement Hortonien (1933)

Il s'agit de la conception la plus couramment admise du mécanisme des débits de crue qui est engagé lors du dépassement de la capacité d'infiltration du sol. La saturation du sol s'opère par le haut (Ambroise 1998), lorsque les dépressions superficielles ont été remplies mais que la capacité d'infiltration ne suffit plus pour évacuer les précipitations tombées ce qui débouche sur l'écoulement de surface (figure 1.2). L'eau qui s'y est infiltrée viendra alimenter la recharge des nappes souterraines qui constitue le débit de base. (Souanef Nasima.2015)

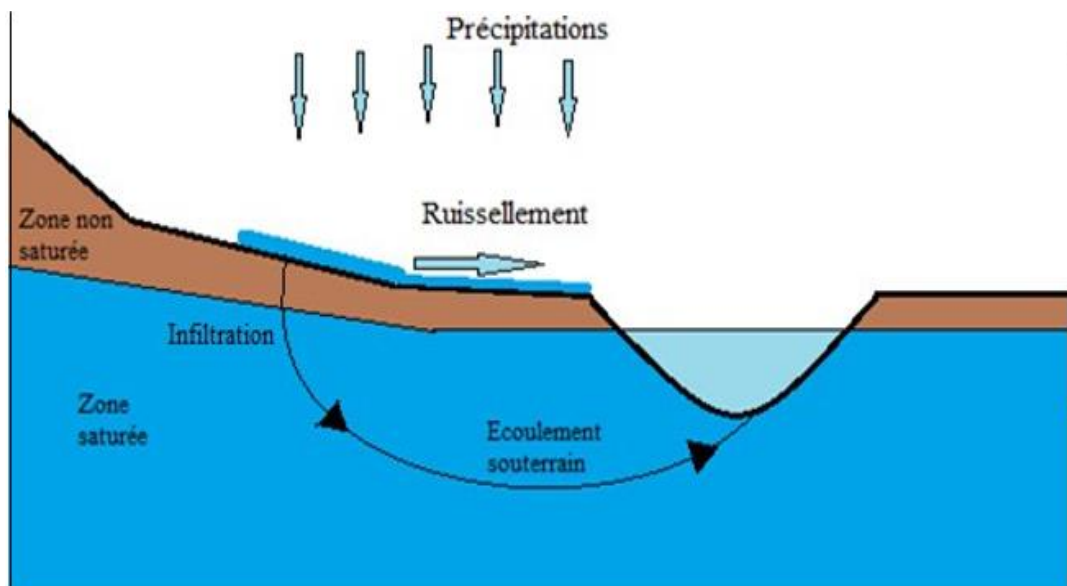


Figure I.3: Ecoulement Hortonien

I.6.1.2.2 Ruissellement sur surfaces saturées

Le ruissellement sur surface saturée est le résultat de la dynamique de la nappe affleurante et se manifeste souvent dans les zones de fond de vallées près des cours d'eau. Ce phénomène a été étudié par plusieurs chercheurs notamment Cappus en 1960, Betson en 1964 et Dunne et Black en 1970, qui ont désigné ces zones comme des « aires contributives saturées », car le ruissellement contribue directement à l'écoulement des rivières. Au fil du temps de nombreuses recherches notamment celles d'Ambroise et al en 1996 ont exploré l'évolution et la connectivité de ces surfaces saturées tant dans l'espace que dans le temps.

Les facteurs de sol et de topographie exercent un contrôle sur l'écoulement latéral et, par conséquent sur le développement des surfaces saturées. Ces influences peuvent être identifiées à travers des indices exclusivement topographiques qui se basent sur l'hypothèse d'un état stationnaire (où l'épaisseur du sol demeure constante) et sur une compréhension incomplète de la variation spatiale des propriétés du sol. (Madi Meriem.2012)

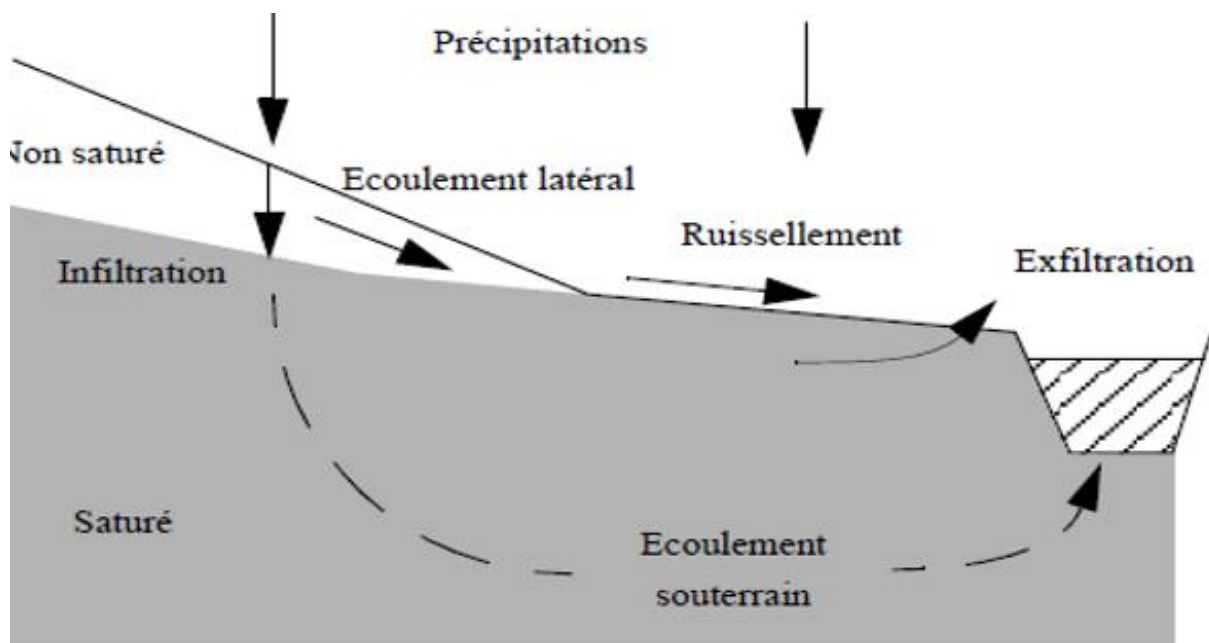


Figure I.4: Ruissellement par saturation et exfiltration (Ward et Robinson.1990)

I.6.1.3 Ecoulement sub-surface

De subsurface peut être considéré comme un écoulement souterrain en proximité avec l'écoulement de surface pouvant être rencontré plusieurs mètres sous la surface.

Le rôle de l'écoulement de subsurface (écoulement hypodermique ou retardé) dans la genèse des crues a été envisagé dès 1936 par Hursh, bien que sa théorie n'ait pas eu le même retentissement que celle de Horton. Il a fallu d'ailleurs plusieurs années pour que les hydrologues reconnaissent la contribution de l'écoulement sous la surface du sol à l'écoulement rapide des crues. Ceci est certainement dû (Ambroise, 1998), aux difficultés que pose l'identification et l'explication des mécanismes permettant d'expliquer les transferts plus ou moins rapides de l'eau à travers le sol. (Benzineb Khadidja.2017)

Dunne et Black (1970) ont démontré que les flux hypodermiques peuvent entraîner une exfiltration observable dans les régions où les apports d'eau associés aux écoulements latéraux surpassent la capacité de transfert d'eau. Dans ce cas le profil devient saturé et le surplus de flux s'écoule en surface. Dans cette situation le sol devient saturé et le ruissellement sur la surface saturée se manifeste. (Souanef Nasima.2015)

I.6.1.4 Processus souterrain

Souterrain est la portion des débits d'un cours d'eau à un instant donné ou cumulée sur une durée donnée issue de l'eau souterraine (International Glossary of Hydrology). L'eau souterraine joue aussi un rôle prépondérant dans la (re) génération des écoulements et plus particulièrement dans le terme « débit de base » de l'hydrogramme (Musy, 2005). C'est aussi une autre explication de l'ancienneté de l'eau dans l'hydrogramme de crue. (Ali Hachemi.2017)

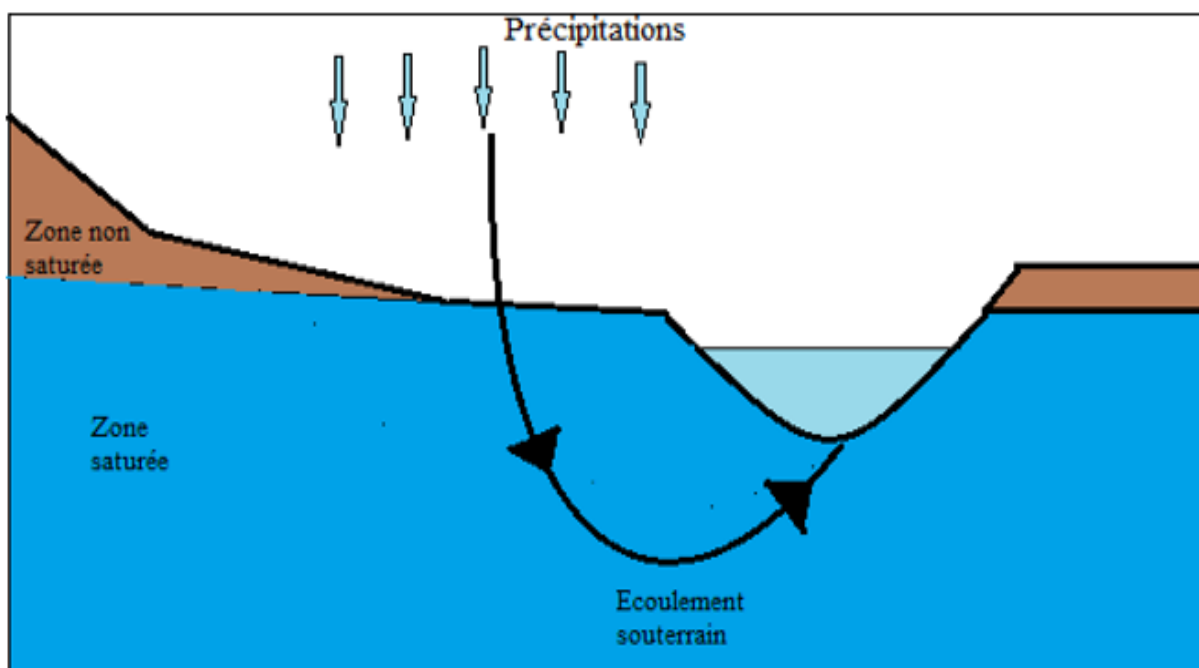


Figure I.5: Ecoulement souterrain

I.6.2 Les facteurs générateurs des crues**➤ Précipitations**

Notre région connaît les précipitations les plus fréquentes. Les inondations sont généralement associées à des pluies torrentielles (MERABET. 2008).

La nature des pluies torrentielles est liée aux facteurs suivants :

- ✓ Durée
- ✓ Intensité
- ✓ Répartition géographique (par exemple. le long des cours d'eau)
- ✓ Fréquence des averses
- ✓ Combinaison de ces facteurs

➤ Fonte des neiges

- ✓ **Crues d'embâcles** : les crues dues aux embâcles (accumulation de glace bloquant le lit des rivières) et inondations dues aux avalanches de glace (rupture de la glace dans les rivières gelées) dans les régions subpolaires (Canada. Sibérie).
- ✓ **Accident** : On cite souvent l'exemple d'un accident : la rupture soudaine d'un barrage qu'elle soit d'origine naturelle ou humaine. Parfois de tels accidents sont liés à d'autres phénomènes particuliers (glissements de terrain pluies torrentielles activité volcanique tremblements de terre. etc.).

I.6.1.2Facteurs indirects

- ✓ Temps de concentration faible.
- ✓ Imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles).
- ✓ Avec en parallèle saturation ou sécheresse (faible perméabilité) du sous-sol.

Conjonction des crues de deux affluents. (Kalbaza Mourad.2016)

I.7 Analyse hydrologique des crues**I.7.1 Les facteurs qui influent sur la forme de l'hydrogramme**

- ✓ **Le forçage climatique** est essentiel à la compréhension des ressources en eau des bassins versants et les précipitations jouent un rôle primordial dans ce processus. La pluie influence directement le cycle de l'eau et son impact sur le bassin versant dépend

de l'intensité et de la durée des épisodes pluvieux. Les précipitations sont très variables dans le temps et l'espace. À l'échelle diurne leurs fluctuations sont étroitement corrélées aux conditions météorologiques ; tandis qu'à l'échelle annuelle elles reflètent les caractéristiques climatiques propres à chaque région. Cette variabilité spatio-temporelle complexifie l'évaluation des ressources en eau car elle repose sur des variations climatiques locales complexes susceptibles d'expliquer la diversité des réponses des écosystèmes aquatiques et des infrastructures observées sur le terrain.

- ✓ **Les conditions initiales** : L'état hydrique et hydrologique d'un bassin à l'instant d'un événement pluvieux influencent profondément sa réponse. Cet état est défini par l'histoire hydrologique du bassin en particulier par les intensités les durées les fréquences et les séquence des précédents événements pluvieux et évaporatoires. Cette dépendance à l'état initial mène à une non linéarité dans la réponse du système bassin versant. Ainsi pour un même volume de pluie tombant sur un sol sec ce volume sera d'abord utilisé pour recharger les réserves du bassin alors qu'il sera disponible pour l'écoulement dans le cas d'un sol humide. Par ailleurs la recharge de nappe et le ruissellement en surface saturée sont des processus nécessitant des conditions hydriques particulières caractéristiques des périodes de hautes eaux. Ce qui amène à dire que dans une condition humide la plupart des processus cité ci-dessus peuvent entrer en action et participer à la genèse des débits de crue. Ambroise (1995) affirme d'ailleurs que « la répartition spatiale et l'évolution temporelle de l'humidité des surfaces et des sols notamment à proximité des fleuves apparaît ainsi parmi les facteurs essentiels de la genèse des différents flux ».
- ✓ **La topographie** : Le dernier facteur de contrôle examiné est la topographie (Anderson et Burt, 1978). La gravité est un facteur de l'écoulement et la géométrie des bassins a une importance pour certains processus Le ruissellement par exemple suit le plus souvent la ligne de la plus forte pente. Il peut se regrouper dans les bas-fonds puis s'organiser en rigoles. Le ruissellement peut être freiné par la microtopographie. La topographie contrôle aussi les apports d'énergie. La pente l'orientation et la position topographique permettent de connaître l'ensoleillement le sens des vents et par conséquent l'organisation de la végétation la transpiration et l'évapotranspiration. Les conditions hydriques des versants dépendent aussi de la topographie. On observe en général une tendance à l'augmentation de l'humidité de l'amont vers l'aval le long des versants. Enfin les écoulements obéissent à la convexité ou à la concavité des pentes de

manière à créer des zones de convergence ou de divergence qui régulent l'humidité.
(Berhail Sabri.)

I.8 Analyse fréquentielle

Devenue un instrument fondamental pour le traitement des signaux l'analyse fréquentielle ou analyse spectrale montre les fréquences où apparaissent des variations avec leur amplitude dont on peut en déterminer la source afin de procéder à sa localisation contrairement à l'analyse temporelle qui ne livre qu'un état global. L'analyse fréquentielle repose sur la transformée de Fourier qui assure le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. (Khadir Djennat.)

I.8.1. Echantillonnage

Un échantillonnage peut être effectué selon les valeurs maximales annuelles ou toutes les valeurs dépassant un certain seuil. Il doit permettre d'obtenir un échantillon de valeurs d'une variable aléatoire vérifiant les hypothèses de :

- Les variables prélevées étant homogènes (c'est-à-dire identiquement distribuées et donc issues d'une même population d'évènements).
- Les variables sélectionnées indépendantes et stationnaires (les paramètres du modèle de la distribution ne varient pas au cours du temps). (Souanef Nasima.2015)

I.8.2 Test hypothèse

Un test d'hypothèse (ou test statistique) est une méthode qui consiste à fournir une règle de décision permettant d'établir sur la base de la réalisation des résultats d'échantillon un choix entre deux hypothèses statistiques. (J-P LENOIR)

I.8.3 Tests d'homogénéité

Au cours d'une investigation concernant une série chronologique il est vital de contrôler l'hypothèse que les observations de la série chronologique sont identiquement distribuées ce qui équivaut à vérifier que les observations de la série chronologique sont homogènes. Le contrôle de cette hypothèse est indispensable avant de se lancer dans toute étude d'inférence

statistique. Le caractère d'homogénéité des observations d'une série chronologique est donc une hypothèse principale d'une étude statistique et dont il serait insensé de faire fi. (Jean-Cléophas.1997)

I.8.4 Test d'indépendance

D'après la définition les échantillons sont dits indépendants si une collection de deux événements quelconques deux à deux vérifie : $\text{Prob}(x_i, x_j) = \text{Prob}(x_i)\text{Prob}(x_j)$. L'indépendance des événements successifs retenus lors de l'échantillonnage peut être vérifiée par plusieurs tests statistiques :

- Le test de Bartlett pour l'autocorrélation
- Le test de Von-Neumann
- Le test de Wald-Wolfowitz (Yakhou Bakheta.2022)

I.8.4.1 Test de Wald- Wolfowitz

Ce test est décrit par Berryman (1984). C'est un test non paramétrique c'est l'équivalent de test du nombre de séquences homogènes (test d'indépendance contre existence d'une tendance) dans la mesure où l'on a rangé par ordre croissant les observations du premier dans l'ordre croissant du second sous-échantillon. On appellera par définition bloc une suite d'observations qui provient du même échantillon. (Jean-Cléophas.1997)

I.8.5 Test de Stationnarité

Également connu comme test de tendance la stationnarité d'un échantillon à déterminer est l'indépendance de l'échantillon par rapport au temps. Une première approche visuelle pour vérifier la stationnarité d'un échantillon consiste à représenter sur un graphique les valeurs des variables en fonction du temps et à voir s'il y'a tendance ; pour tester la stationnarité on peut avoir recours au :

- test de Mann-Kendall
- test de Spearman (Yakhou Bakheta.2022)

I.8.5.1 Test de Mann-Kendall

Le test de Mann Kendall (non paramétrique) est largement utilisé pour la détection de tendance.

Soit $X = (X_1, \dots, X_N)$ N variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

Montrons que l'hypothèse nulle H_0 , correspondant à l'hypothèse de stationnarité et H_1 l'hypothèse d'instationnarité de X .

La statistique de Mann-Kendall s'écrit alors :

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{Signe}(X_j - X_i) \quad \text{où } \text{signe}(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Sous l'hypothèse H_0 , nous avons :

$$\begin{cases} E(S) = 0 \\ V(S) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{18} \end{cases}$$

De plus en posant $Z = \frac{S - \text{signe}(s)}{\sqrt{V(S)}}$, on a pour $N > 10$: $Z \sim N(0,1)$.

On rejette donc H_0 avec un risque α si $|Z| > u_{\alpha/2}$ avec $P(N(0,1) > u_{\alpha/2}) = \alpha/2$.
(Philippe Cantet, 2009)

I.8.6 Choix du modèle d'ajustement

De faire concorder un modèle fréquentiel à un échantillon donné n'est autre que de porter les données dans une fonction et ses paramètres alors que ces données se situent dans le même échantillon. Le choix d'un modèle d'analyse fréquentielle dans le cadre d'une expression du recours à des quantiles semble peut-être l'une des étapes les plus délicates du processus des incertitudes les plus grandes (Meylan & al. 2012). L'adoption d'un modèle fréquentiel pour étudier et décrire les phénomènes hydrologiques est ainsi un acte un choix identifié. Dubreuil (1974) fournit des éléments d'aide au choix de la loi théorique à retenir :

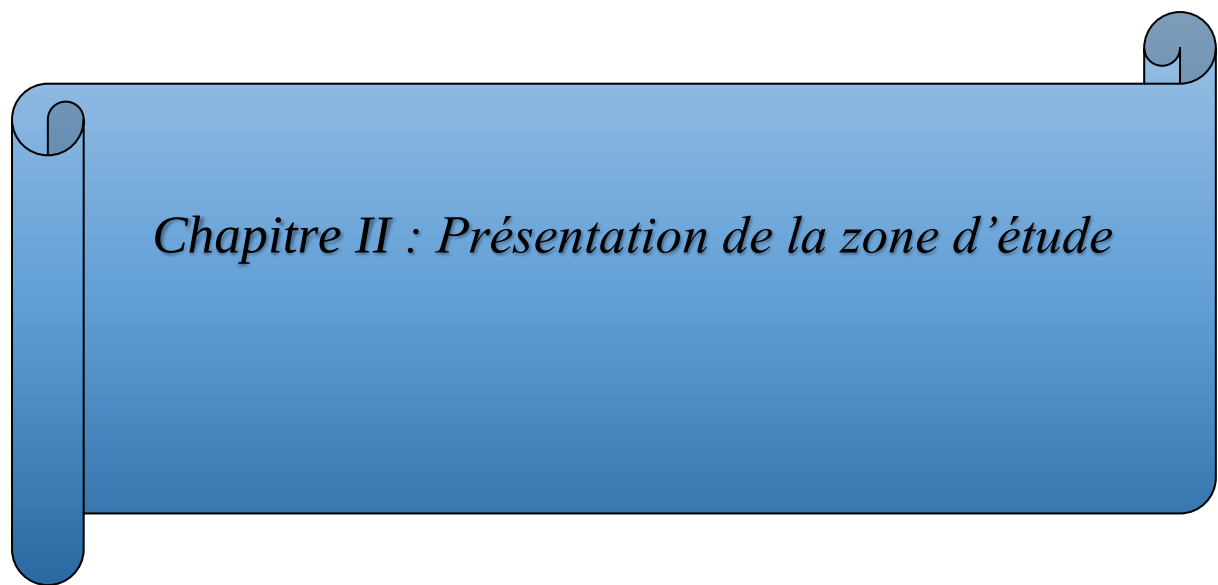
1. Dans une région climatique donnée une variable hydrologique déterminée suit généralement la même loi en un site d'observation donné d'où l'intérêt des études de systèmes et de la connaissance de toute étude antérieure.
2. En l'absence d'information régionale un essai de report graphique des points observés sur papier à échelle gaussienne des abscisses ce qui permettra d'envisager une loi normale ou une

loi dissymétrique. Selon Musy et Meylan (1999) le choix du modèle fréquentiel est primordial pour la validité des résultats d'une analyse fréquentielle et encore faut-il qu'il n'y ait pas de formule universelle pour choisir un modèle. (Yakhou Bakheta.2022)

I.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, On donne quelques généralités sur les crues et analyse fréquentielle.

La réduction des dommages causés par les catastrophes nécessite avant tout une connaissance des régions à risque, ainsi que l'identification des facteurs qui favorisent et amplifient ces phénomènes. Aussi une enquête approfondie qui conduit à la décision la plus appropriée quant aux méthodes utilisées pour une analyse de fréquence des crues, résultant en une meilleure compréhension du phénomène et des prévisions plus précises.



Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique de la zone d'étude

Le sous bassin versant de la ISSER SEKKAK se situe au nord-ouest de territoire algérien. Il a une superficie de 834.189 km² avec une altitude maximale 1572 mètres.

C'est un affluent rive gauche de l'oued Isser (lui-même affluent rive droite de la Tafna) Avec lequel il conflue au Nord d'Aïn Youcef prend naissance sur le plateau de Terny au Sud De Tlemcen à la source d'Aïn Rhannous.

Le bassin de l'oued Sikkak comprend deux secteurs bien distincts :

- au Nord et au centre des dépressions remplies de sédiments tertiaires et quaternaires.

La zone montagneuse comprend :

- au Sud le plateau de Terny entouré de plusieurs massifs élevés culminant au **Dj. Nador** (1579m).

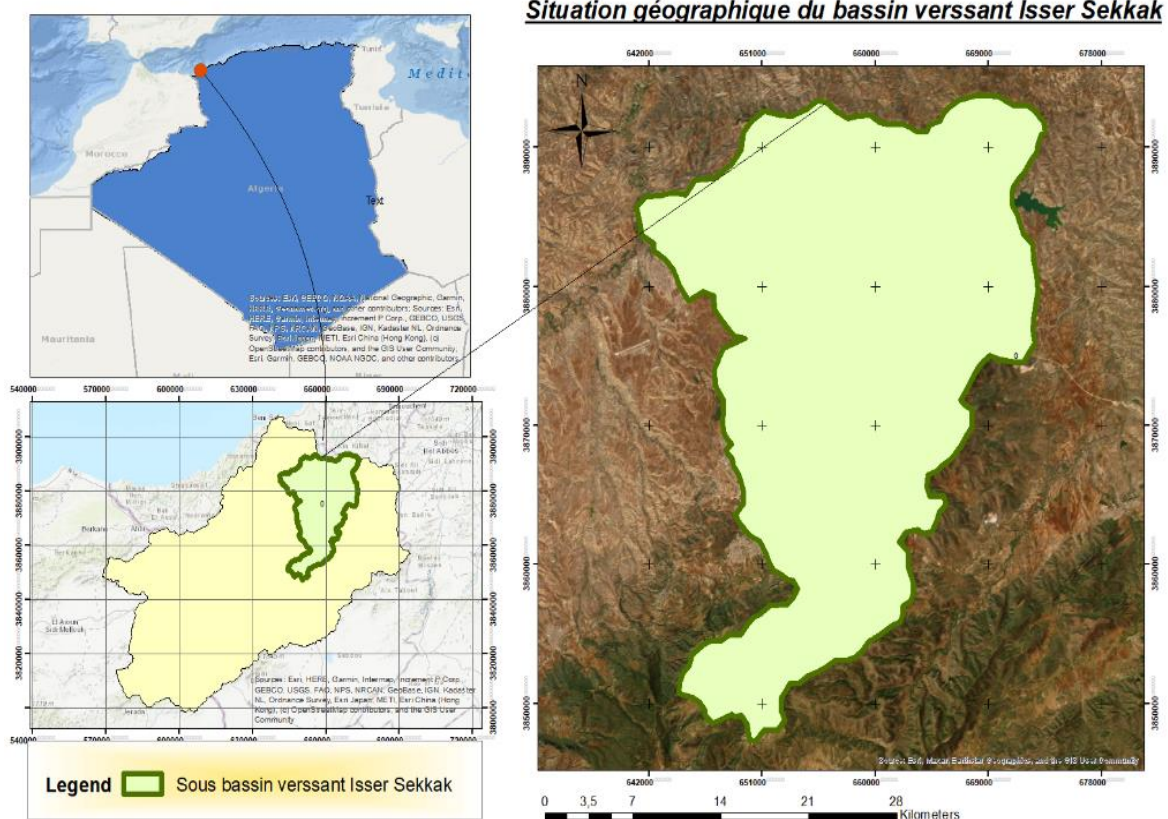


Figure II.1: Situation géographique de la zone d'étude

II.2 Morphométries du bassin

II.2.1 Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Les caractéristiques morphométriques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Pourriot et al., 1995). Il est donc intéressant de quantifier ces paramètres par des termes simples qui permettront la schématisation du bassin versant.

Pour que la quantification du bassin versant par le biais de la morphométrie soit rigoureuse et valable il faut que cette dernière soit appliquée à des bassins de taille réduite et homogène du point de vue géologique.

Les études morphométriques des sous bassins ont été réalisées à partir du MNT1 du bassin versant de la Tafna qui a une haute résolution spatiale (30 mètres). (ketrouci khadidja.2014).

II.2.1.1 Caractéristiques de forme

a. Caractéristiques géométriques d'un bassin versant

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau les débits vont être partie reliés à sa surface. La surface du bassin versant peut-être mesurée : - par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent. - par l'utilisation d'un planimètre ou mieux. - par des techniques de digitalisation.

Le périmètre peut être mesuré : - par l'utilisation d'un cordon. - par l'utilisation d'un curvimètre ou mieux - par des techniques de digitalisation.

La délimitation du bassin versant de Isser sikkak ainsi que le calcul de sa superficie et de son périmètre ont été réalisés à l'aide de l'outil **ArcGIS 10.8**

b. Indice de compacité de Gravelius

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin Versant. Par exemple une forme allongée favorise pour une même pluie les faibles débits de pointe de crue ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants.

Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration.

En revanche les bassins en forme d'éventail présentant un temps de concentration Plus court auront les plus forts débits de pointe.

Si $K = 1$ alors la forme du bassin versant à la même compacité que celle d'un cercle. Habituellement K varie entre 2 et 4

L'indice de compacité permet donc l'évaluation globale de la longueur du réseau de drainage.

Plus le bassin est compact plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de circulation des eaux jusqu'à l'exutoire est court avec comme conséquence une augmentation du risque des crues (**figure II.2**).

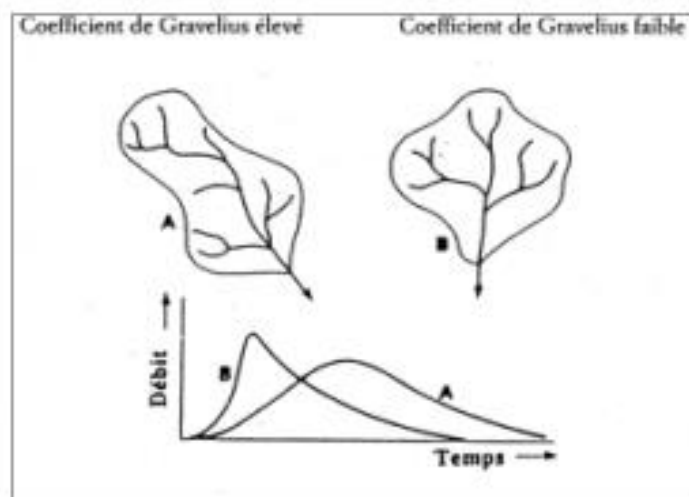


Figure II.2: Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp.1979)

Ce coefficient permet de différencier entre les bassins allongés et ceux ramassés. Il s'établit en comparant le périmètre du bassin (P) à celui d'un cercle de même superficie (A).

Le coefficient K_C de Gravelius est égal au rapport de ces deux grandeurs. Si on désigne par A la surface du bassin en kilomètres carrés et par P son périmètre en kilomètre.

$$K_C = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (II.1)$$

Le rectangle équivalent est un modèle établi par ROCHE. Il assimile le bassin en un rectangle ayant même surface et périmètre que celui du bassin versant considéré de longueur

L et largeur l. l'exutoire est représenté par une largeur du rectangle et les courbes de niveaux sont des parallèles. (Benmechernane Nabila.2013).

C. Rectangle équivalent ou Rectangle de Gravelius

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \dots \dots \dots (II.2)$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \dots (2-2) \dots \dots \dots (II.3)$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent en (Km) ;

l : largeur du rectangle équivalent en (Km) ;

S : La superficie du bassin versant (Km²) ;

K_c : Le coefficient de compacité ou de Gravelius.

Les résultats sont reportés sur le Tableau II.1 :

Tableau II.1: Caractéristique de forme bassin versant Isser Sikkak

Bassins	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	K _c	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
O.Isser sikkak	834.189	169.479	1.64	73.16	11.4

Les résultats obtenus montrent que le bassin d'Oued Isser (Sikkak) présente une Superficie de 834.189 km² et un périmètre de 169.479 km. Le coefficient de compacité de Gravelius (K_c = 1.64) indique que le bassin a une forme allongée et s'éloigne d'une forme Circulaire.

Cette morphologie allongée implique un temps de concentration relativement élevé, ce qui signifie que les eaux de ruissellement mettent plus de temps à atteindre l'exutoire. Par conséquent, le risque de crues soudaines est moins important comparé à un bassin plus compact.

Le rectangle équivalent (73.16 km de longueur et 11.4 km de largeur) confirme également cette tendance à l'allongement du bassin. Ainsi, le comportement hydrologique du bassin est caractérisé par une réponse plus lente aux précipitations.

II.2.1.2. Caractéristiques de relief

Aborder la question du relief impose l'étude topographique du bassin versant. L'altitude influe sur la météo tandis que la pente influe sur la vitesse d'écoulement et la hauteur d'eau du cours d'eau donc sur le débit. La courbe hypsométrique est un bon outil de visualisation de la pente du bassin versant et de son altitude moyenne. La pente moyenne Renseigne sur la topographie le temps de concentration et le débit de pointe2.

A. courbes Hypsométriques

Elle fournit une vue synthétique sur la pente du bassin donc du relief. Cette courbe Représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

Elle porte en ordonnée la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en abscisse.

Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie au-delà d'une certaine altitude. **(Benmechernane Nabila.2013).**

A.1.Interprétation de l'aspect des courbes Hypsométriques

Des recherches récentes ont montré l'aspect général des courbes selon l'état d'érosion du bassin versant :

- *Pour les bassins plus jeunes la superficie est faible par rapport au changement d'altitude initiale ce qui est caractéristique des bassins abrupts ;

- *Les vieux bassins présentent l'inverse ; c'est-à-dire une plaine douce près d'un cours D'eau où l'altitude varie très peu malgré une superficie importante ;

- *Le troisième cas se rapproche donc de l'état dit « mature » du moins selon cette Classification du degré d'érosion associé à l'âge du bassin. (Figure II.3) courbe hypsométrique et profil d'un cours d'eau). **(Mme ketrouci Khadidja.2014).**

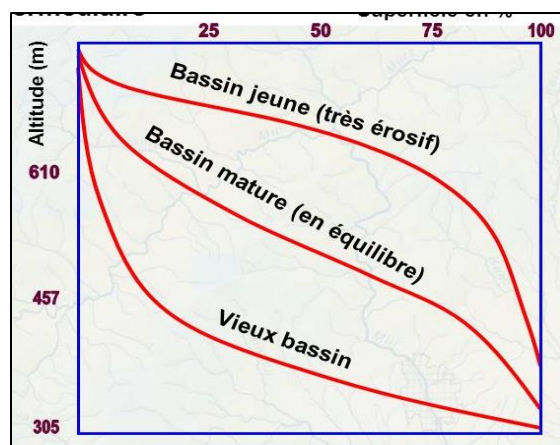


Figure II.3:L'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion du bassin versant

A.2. Courbe hypsométrique bassin versant d'Isser Sikkak

Parmi les oueds principaux de ce bassin l'oued Sikkak et l'oued Isser. La courbe hypsométrique du bassin de l'oued Sikkak indique la présence du plateau de Terny et les falaises d'El Ourit vers les hautes altitudes et de la plaine d'Hennaya vers les basses altitudes. En outre la forme de cette courbe présente bien l'état d'équilibre vieillissant du bassin offrant un potentiel érosif moyen à faible (Tableau II.2). (figure II.4). (Ketrouci Khadidja.2014).

Tableau II.2:Répartition hypsométrique du bassin versant Isser Sikkak

Altitudes (M)	Superficies Partielles		Superficies Cumulées	
	(Km2)	(%)	(Km2)	(%)
1572-1400	7.932	0.95	7.932	0.95
1400-1200	35.501	4.26	43.433	5.21
1200-1000	68.172	8.17	111.605	13.38
1000-800	37.278	4.47	148.883	17.85
800-600	82.257	9.86	231.14	27.71
600-400	262.014	31.42	493.154	59.13
400-200	288.678	34.61	781.832	93.74
200-74	52.357	6.28	834.189	100.00

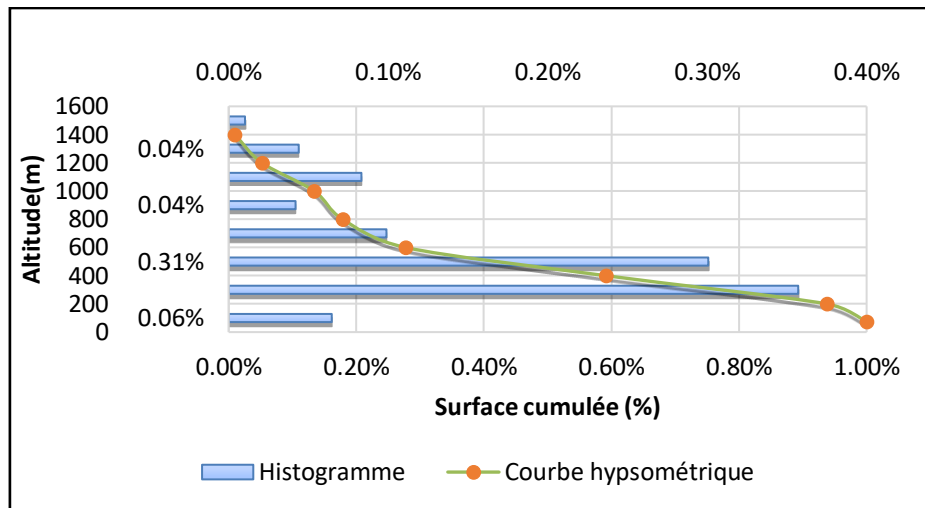


Figure II.4: Courbe hypsométrique et histogramme de fréquences altimétriques du bassin versant d'Isser Sekkak

La carte hypsométrique de sous bassin versant Isser sekkak réaliser par logiciel ArcGIS 10 ;8 est représenté dans la figure II.5 suivantes

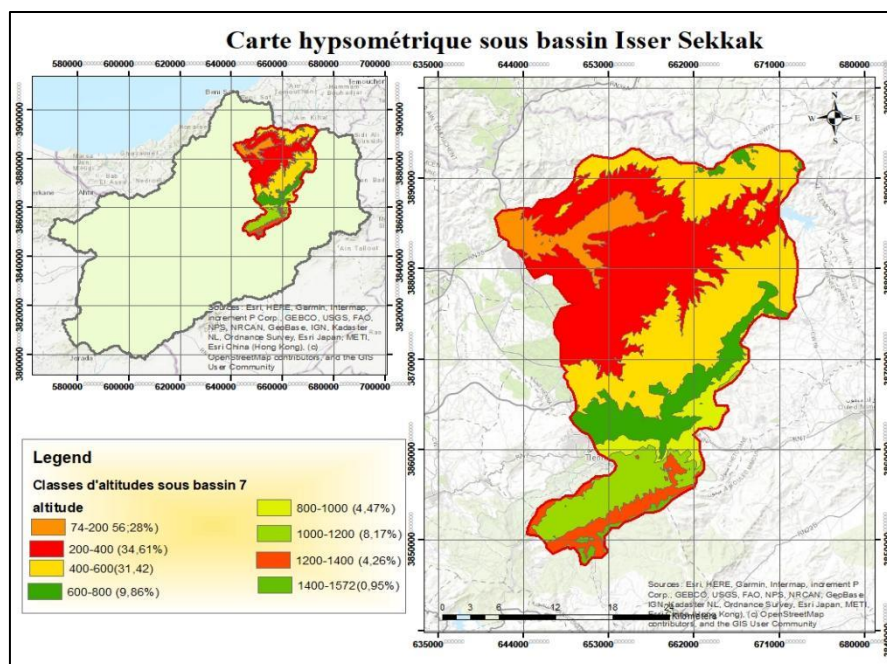


Figure II.5: Carte hypsométrique du bassin versant du Isser Sekkak

II.3 Etude du réseau hydrographique

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des Phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques.

Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les

Formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont :
La Densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl).

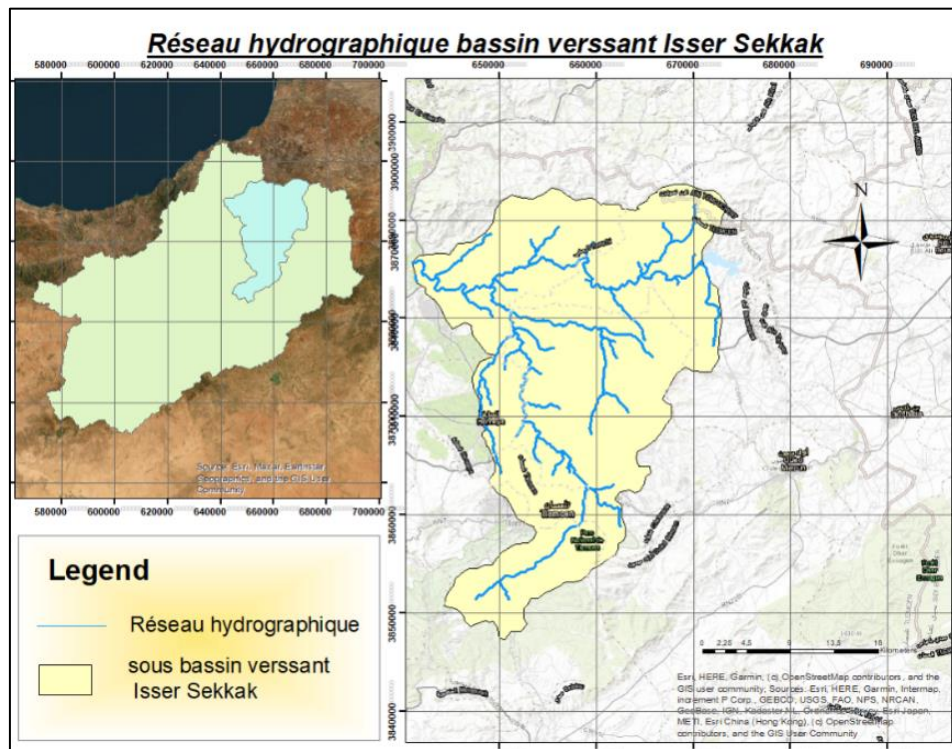


Figure II.6: Réseau hydrographique bassin versant Isser Sekkak

II.3.1 Densité de drainage

La densité de drainage est définie par :

$$Dd = \Sigma L / A \dots\dots\dots (II.4)$$

Où :

Dd : densité de drainage en km/km²

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km².

II.3.2 Rapport de confluence

Il est défini par :

$$Rc = Nn / N(n+1) \dots\dots\dots (II.5)$$

Où :

Rc : rapport de confluence.

Nn : nombre de cours d'eau d'ordre n.

Si l'on admet que, pour un bassin parfaitement organisé **Rc = 2** ; les sous bassins de la Tafna sont mal hiérarchisés.

II.3.3 Rapport des longueurs

La définition est la suivante :

$$RL = L(N+1) / LN \dots\dots\dots (II.6)$$

LN : longueur de cours d'eau d'ordre n.

Les valeurs sont comprises entre 1.82 et 3.37 elles sont pour la plupart approximatives.

Les résultats sont reportés sur le **Tableau (II.3)** :

Tableau II.3: Paramètres morpho métriques des principales unités hydrologiques de la tafna

Bassins	Dd	Rc	RL
O.Isser sikkak	2.33	3.37	1.82

II.3.4 Hauteurs caractéristiques

Les hauteurs caractéristiques d'un bassin versant représentent les différentes altitudes qui décrivent son relief.

Elles permettent de comprendre la topographie du bassin notamment l'altitude maximale, minimale et moyenne.

Ces paramètres jouent un rôle important dans l'écoulement des eaux l'érosion et le comportement hydrologique du bassin.

a. Altitude maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. - L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin - l'altitude minimale considère le point le plus bas généralement à l'exutoire.

b. Altitude moyenne du bassin versant

Ce paramètre est calculé à partir de la courbe hypsométrique il est défini comme étant

L'ordonnée moyenne de la courbe donnée par la relation suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum(h_i \times S_i)}{S} \dots\dots\dots (\text{II.7})$$

Avec :

Si : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km²) ;

Hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives en (m) ;

S : Superficie du bassin versant (km²).

c. L'altitude médiane

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

d. L'altitude H95%

L'altitude **H95%** correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale Du bassin sur la courbe hypsométrique.

e. L'altitude H5% :

L'altitude **H5%** correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du Bassin sur la courbe hypsométrique.

Tableau 4: Les altitudes caractéristiques des sous bassins

Bassins	Hmoy(m)	H95%(m)	H5%(m)	Hmax(m)	Hmin(m)	Hméd(m)
O.Isser sikkak	538.056	174.638	1209.86	1572	74	458.11

II.3.5. Indices de pente et relief

Le relief d'un bassin est caractérisé par des indices qui ont été définis pour rendre compte

De l'influence de la pente sur le régime hydrologique pour comparer des bassins entre eux. etc.

La carte des pentes (figure II.7) montre que le sous-bassin présente un **relief fort à assez fort**. Cela est dû au volume important des montagnes et à l'érosion qui a creusé le relief.

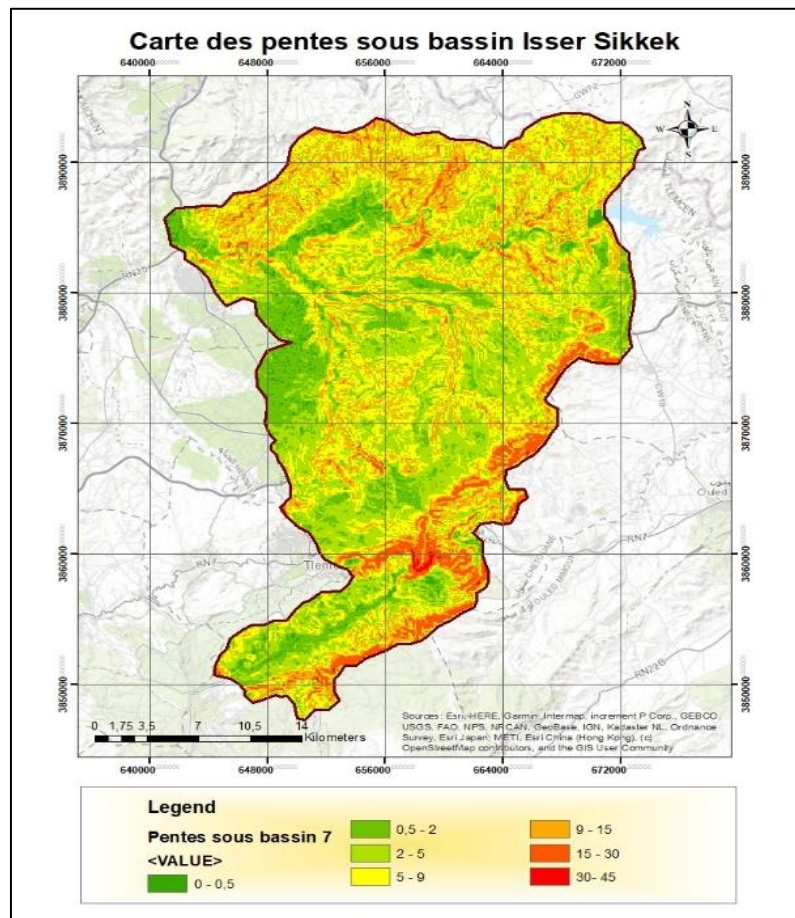


Figure II.7: Carte des pentes sous bassin Isser Sekkak

A. Indice de pente de Roche IP

L'indice de pente introduit par Roche (1963) est donné par :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{Si(H_i - H_{i-1})} \dots \dots \dots (II.8)$$

Où :

Ip : Indice de pente de Roche

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

Si : Surface partielle en (%) comprise entre deux altitudes H_i et H_{i-1} .

B. Indice de pente globale Ig

L'indice de pente global I_g sert à caractériser la pente d'un bassin et de permettre des Comparaisons et des classifications. Il est déterminé à partir de la connaissance de la

Répartition hypsométrique du bassin. Il est donné par la formule : **(Benmechernane Nabila.2013).**

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots (II.9)$$

Où :

D : Dénivelée entre H5% et H95% (m) ;

H5% et **H95%** : sont les altitudes correspondantes à **S5%** et **S95%** (m) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (km)

C. La dénivelée Spécifique « Ds » :

L'indice décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente. il était donc difficile ,De comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique **Ds** ne présente pas Cet inconvénient elle dérive de la pente globale **Ig** en la corrigeant de l'effet de surface Admis étant inversement proportionnel à **A**. **(Benmechernane Nabila.2013).**

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = \frac{D}{L} \times \sqrt{S} \dots\dots\dots (II.10)$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent (m) ;

S : Surface du bassin versant (km²).

Les valeurs d'Ig et Ip et Ds sont présentées dans le tableau (II.5)

Tableau II.5: Indices de pentes et reliefs des sous bassins Issser Sikkak

Bassins	Ip	Ig	Ds	Relief selon Ds
O.Isser sikkak	4.06	14.16	409.01	Fort (R6)

Selon la classification du relief donner par l'O.R.S.T.O.M (tableau II.6). On peut obtenir La nature du relief.

Tableau II.6: La classification d'O.R.S.T.O.M. (1) selon Ds

La classification	Etat du relief	L'intervalle de Ds
R1	Relief très faible	Ds<10m
R2	Relief faible	10m<Ds<20m
R3	Relief assez faible	25m<Ds<50m
R4	Relief modéré	50m<Ds<100m
R5	Relief assez fort	100m<Ds<250m
R6	Relief fort	250m<Ds<500m
R7	Relief très fort	Ds>500m

D'après les résultats obtenus on peut conclure que les pentes du bassin versant Isser sikkak sont : relativement fortes. Avec un Relief marqué (fort). Ce qui favorise un écoulement rapide des eaux une faible infiltration et un risque élevé des crues torrentielles.

D. Coefficient de torrentialité

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

$$CT = D_d \times F_1 \dots\dots\dots (II.11)$$

Avec :

D_d : densité de drainage

F₁ : fréquence des thalwegs élémentaires $F_1 = N_1 / A$ avec :

N₁ : nombre de cours d'eau d'ordre 1

E. Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus Éloignée pour parvenir à l'exutoire pour son calcul nous faisons appel à la formule de Giandotti.

$$T_c = 4 (A)^{0.5} + 1.5 L / 0.8 (H_{moy} - H_{min})^{0.5} \dots\dots\dots (II.12)$$

Où.

T_c : temps de concentration (heures)

A : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{min} : altitude minimale (m)

Tableau II.7: Valeurs des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations des eaux des sous bassins

Bassins	Coefficient de torrentialité Ct	Temps de concentration Tc
O.Isser sikkak	5.31	12h 52 mn

Tableau 8: Récapitulatif de bassin versant se Isser Sikkak

Paramètres	Symbole	Valeurs	Unités
Superficie du bassin	A	834.189	Km ²
Périmètre du bassin	P	169.479	Km
Coefficient de compacité de Gravelius	Kc	1.64	Sans Unité
Longueur du rectangle équivalent	L	73.16	Km
Largueur du rectangle équivalent	I	11.4	Km
Densité de drainage	Dd	2.33	Km/km ²
Rapport de confluence	Rc	3.37	Sans Unité
Rapport de longueurs	Rl	1.82	Sans Unité
Altitude moyenne	Hmoy	538.056	M
Altitude maximale	Hmax	1572	M
Altitude minimale	Hmin	74	M
Altitude médiane	Hméd	458.11	M
Altitude H5%	H5%	1209.86	M
Altitude H95%	H95%	174.638	M
Indice de pente de Roche	Ip	4.06	m/km
Indice globale de pente	Ig	14.16	m /km
Dénivelée spécifique	Ds	409.01	M
Classe du relief		Fort(R6)	
Coefficient de torrentialité	Ct	5.31	Sans Unité
Temps de concentration	Tc	12h52min	h :min

II.4 La géologie du bassin

Dans le secteur étudié deux grands ensembles sont à distinguer : -au Nord une dépression où le principal élément ayant contribué au remplissage est représenté par le Miocène et le Quaternaire. -au Sud et à l'Est, les massifs montagneux où affleurent principalement des terrains Jurassiques

II.4.1 Le secondaire

La série litho stratigraphique présentée de bas en haut selon Benest et Bensalah 1999 : **(Ketrouci Khadidja.2014).**

A. Les grés de Boumediene (Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur)

Ce sont des grés à éléments fins sous forme de gros bancs séparés par des inter lits argileux le ciment presque toujours calcaire. Les alternances sont souvent rouges ou vertes et degrés à stratification oblique. Il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse qui affleure aux environs de Tlemcen en particulier près du sanctuaire de Sidi Boumediene. L'épaisseur de cette formation est de 200 à 400m en moyenne. Ces grés sont situés particulièrement dans les forêts de Zarifet et d'Hafir au Sud-Ouest de Terny au niveau des cascades d'El Orit et vers l'Est, dans la région d'Oum El Allou.

B. Les calcaires de Zarifet (Kimméridgien supérieur)

Cette formation tire son nom du col de Zarifet situé à 5 Km au Sud-Ouest de Tlemcen. Il s'agit de bancs calcaires de position intermédiaire entre les grés de Boumediene et les dolomies qui forment les falaises des environs de Tlemcen. Leur base est caractérisée par quelques bancs de calcaires micritiques détritiques et marneux. La majeure partie de la formation est constituée par des pelmicrites en bancs épais souvent constellées de Clypeina Jurassique (Favre). Elle peut être réduite ou partiellement dolomitique (épaisseur de 25m environ au col de Zarifet).

C. Les Dolomies de Tlemcen (Kimméridgien terminal)

Cette formation correspond au grand escarpement dolomitique qui domine Tlemcen et couronne le cirque des cascades. Les Dolomies qui la composent en grande partie sont parfois grossièrement cristallines en raison d'une dolomitisation tardive. Dans la partie sommitale se différencient localement des calcaires de Stah. Elles sont assez répandues dans le groupement

puisque'elle affleure au djebel Tefatisset. Ain El-Hout et Oudjlida. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 300m dans la région de Tlemcen.

D. Les marno-calcaires de Raourai (Tithonien basal)

Il s'agit d'alternance de marnes gris verdâtres ou blanchâtres et de calcaires marneux durs. C'est une formation plutôt calcaire que marneuse avec une épaisseur de 100m en moyenne et près de 400m au djebel Raourai. Cette formation est particulièrement bien développée sur djebel Tefatisset à la limite Ouest du groupement au niveau de la zone champ de tir djebel Ain El-Hout et El-Hadid au Nord de Chetouane. Au-dessus de ces marno-calcaires viennent les « calcaires de Lato » définis par Benest en 1972. Il s'agit de micrites et de pelmicrites à stratifications obliques en bancs épais.

E. Les Dolomies de Terny (Tithonien inférieur)

Il s'agit de dolomies massives (100m en moyenne) bien imposée sur le plateau de Terny ou elles débutent par des niveaux à silex stratiformes. Cette formation qui peut être partiellement calcaire montre souvent des stratifications obliques et entrecroisées ainsi que des passées de laminites stomatologiques.

F. Les marno-calcaires de Hariga (Tithonien supérieur)

Ils affleurent dans le secteur étudié uniquement à l'Est de Terny près du barrage de Meffrouch où seule leur base calcaire est conservée. Cette formation comprend une alternance de calcaire avec quelques passées de laminites et de marnes plus ou moins tendres avec une épaisseur de 165m à djebel Hariga d'El Gor.

II.4.2 Le tertiaire

Il est représenté par des dépôts essentiellement marins. On peut distinguer en partant des niveaux les plus anciens : **(Ketrouci Khadidja.2014).**

A. L'Eocène

Représenté par des grés fissurés à ciment argileux alternant avec des marnes verdâtres, leur épaisseur est de 50m. Elles affleurent dans la vallée de l'Oued Sekkak.

B. Le Miocène inférieur

Se développe uniquement à l'Ouest de l'agglomération d'Ain El Hout. Il débute par une assise de poudingues à nombreuses valves d'Ostréa qui s'appuient sur les dolomies de Tlemcen. Ces poudingues hétérométriques et polygéniques sont formés par des éléments calcaires dolomitiques et gréseux unis par ciment calcaire. Ce faciès très résistant et fissuré montre un granoclassement normal avec des intercalations marneuses à la base. Il est discordant sur les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur. Il s'agit de dépôt argilo-gréseux autochtones. L'épaisseur moyenne de conglomérats peut être estimée à 20m. et des marnes sont de 70m.

C. Miocène moyen

Il est constitué par une épaisse série de marnes grises ou bleutées dans la masse devenant ocre par altération. Au sein de cette série s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes plus fréquents au sommet. L.Gentil (1902) a trouvé dans les marnes du Ravin de l'Agadir sur la rive gauche de l'oued Saf-Saf et au Nord de Tlemcen, un gisement de fossiles important par le nombre et la variété des espèces attribué à l'Helvétien. Ces marnes sont très développées dans les vallées de l'oued Amyer où leur puissance est de l'ordre de 100m.

D. Miocène supérieur "Tortonien"

Formé par des dépôts de grès jaunes d'or ou citron fissuré atteignant 20 à 30m d'épaisseur. Ils s'y intercalent des valves d'Ostréa crassissima que l'on peut voir particulièrement bien au niveau de ravin de l'Agadir et près de Mansourah à Ain Deheb.

II.4.3 Le quaternaire

Une étude de ces dépôts continentaux a été récemment proposée par P.Guardia 1975 :

A. 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 des travertins proviennent de la dissolution interne des massifs calcaire-dolomitiques grâce à la quantité de carbonate de calcium déposée par les eaux des émergences. Ils constituent de puissants dépôts pouvant atteindre 60m (Lalla Setti au Sud de Tlemcen et Ain Fezza).

-La croûte calcaire : Cette croûte est formée par un encroûtement particulièrement bien marqué dans la plaine d'Hennaya où il masque partiellement les grès Tortonien. Cette croûte de teinte claire et des croûtes lamellaires est caractérisée par une petite épaisseur ne dépassant pas 1m.

-Le glacis 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.

B. Les alluvions récentes

Ce sont des dépôts limoneux occupant les parties basses des plaines et des vallées aux abords des cours d'eau.

II.5 L'occupation du sol

L'occupation du sol se définit comme la manière dont la surface de la Terre est couverte par la nature ou modifiée par les activités humaines. Ce concept englobe à la fois les éléments naturels (forêts zones humides) et les aménagements créés par l'homme (terres agricoles villes infrastructures). En cartographie l'objectif est de diviser le paysage en une mosaïque de zones homogènes chacune représentant une catégorie d'occupation distincte.

D'après les figures II.8 les cultures occupent une grande partie de l'occupation du sol dans le bassin de la Isser sekkek.

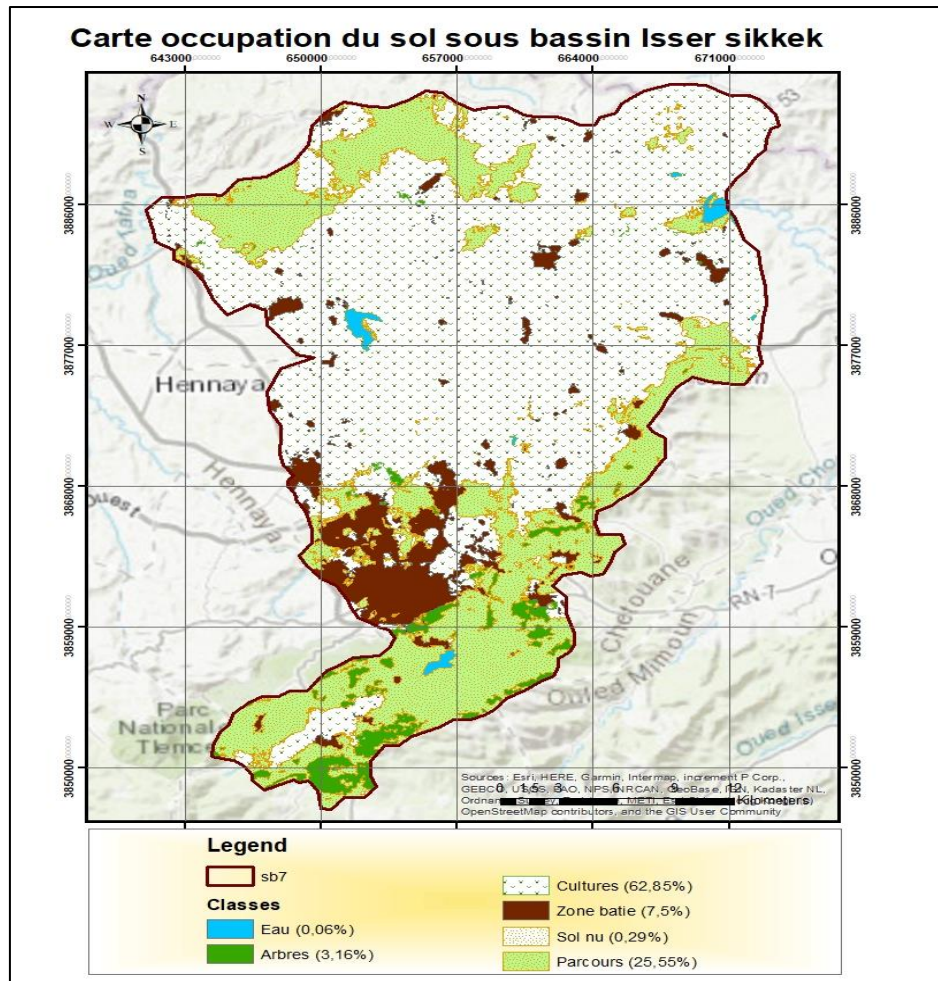


Figure II.8: Carte d'occupation du sol bassin versant Isser Sekkek

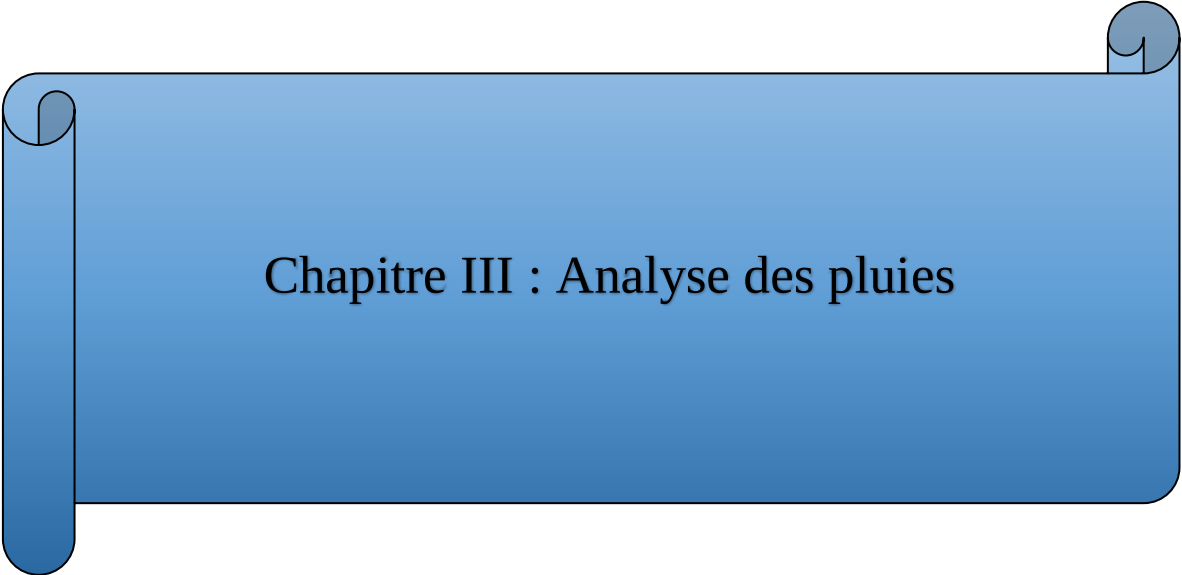
II.6 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les principales caractéristiques physiques et Morphométriques du bassin de la Tafna.

Les résultats montrent que le relief la lithologie et la densité de drainage influencent Le comportement hydrologique.

Par ailleurs le couvert végétal dégradé et les pentes accentuées favorisent le ruissellement et la formation de crues.

Ainsi ces facteurs jouent un rôle déterminant dans la genèse des crues au sein du Bassin.



Chapitre III : Analyse des pluies

III.1 Introduction

Les précipitations sont logiquement considérées comme l'élément hydrologique clé à l'origine de la réponse d'un bassin versant en termes de débit. En hydrologie de surface, la pluie constitue le forçage principal qui dicte toute la dynamique des écoulements. Comprendre et caractériser cette variable météorologique est donc une étape préalable indispensable pour appréhender le comportement d'un cours d'eau, estimer les débits de pointe et anticiper les risques de crue.

III.2 Etude des précipitations

Afin de mieux appréhender l'étude de la pluviométrie. Nous avons choisi des séries de précipitations moyennes Annuelles pour les stations pluviométriques du bassin de l'oued Isser Sikkak. Ces stations se localisent dans ce bassin tel que l'indique la figure (III-1) Les caractéristiques géographiques avec leurs périodes d'observations sont fournies dans le tableau (III-1).

Tableau III.1: Caractéristiques des stations pluviométriques

N	Code	Nom de la Station	Période D'observation	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Pluie moyenne Annuelle
01	16 0705	Lalla setti	1996-2011	1.19	34.52	1020	492.14
02	160726	Tlemcen	1996-2011	1.47	35.02	832	505.09
03	16 0702	Bensakrane	2005-2020	1.224	35.075	260	516.10

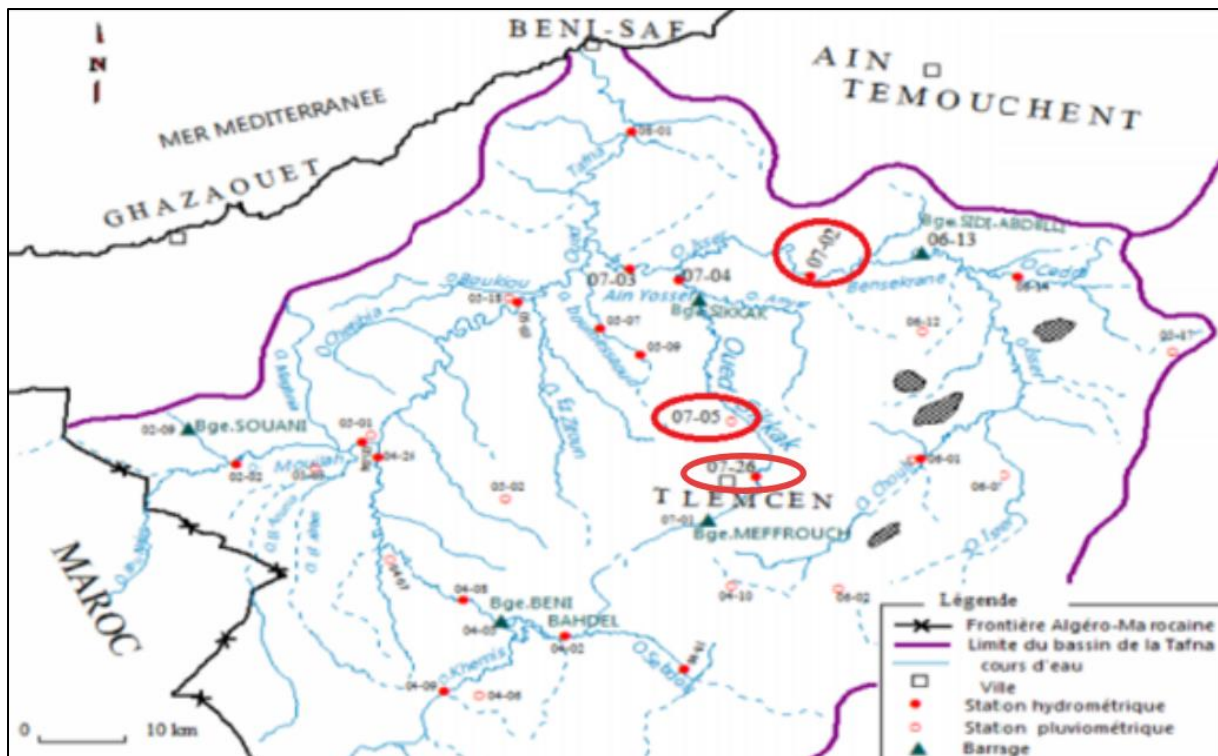


Figure III.1: Localisation des stations pluviométriques de bassin versant Isser Sekkak

✓ Test d'homogénéité

On a établi Par le moyen de la méthode des « Doubles Cumuls ». Une vérification de l'homogénéité des totaux annuels. A l'échelle du bassin d'oued isser sekak. la station de référence de Lalla Setti a été choisie au titre d'une série de 16 ans pour la raison de la continuité de ses données. De leur fiabilité ainsi que de leur longueur relative. Chacune des stations servira comme base de comparaison des postes voisins. La variation de la pluviométrie dans le poste de Bensakrane et Tlemcen est comparée à celles de Lalla Setti et dont la figure III.2 et III.3 montre une bonne corrélation durant les années observées dans les stations et confirme l'homogénéité du poste de Bensakrane et Tlemcen. (Hakmi Zohra.2013)

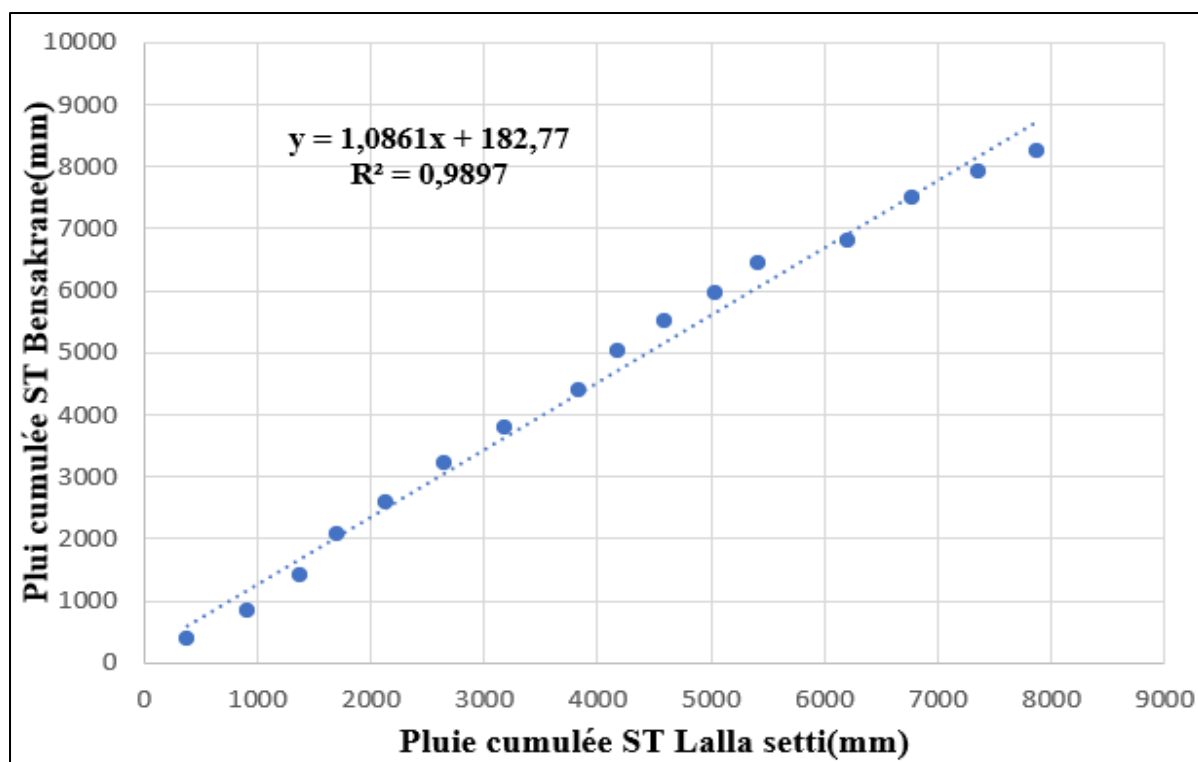


Figure III. 2: Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Lalla Setti et Bensakrane

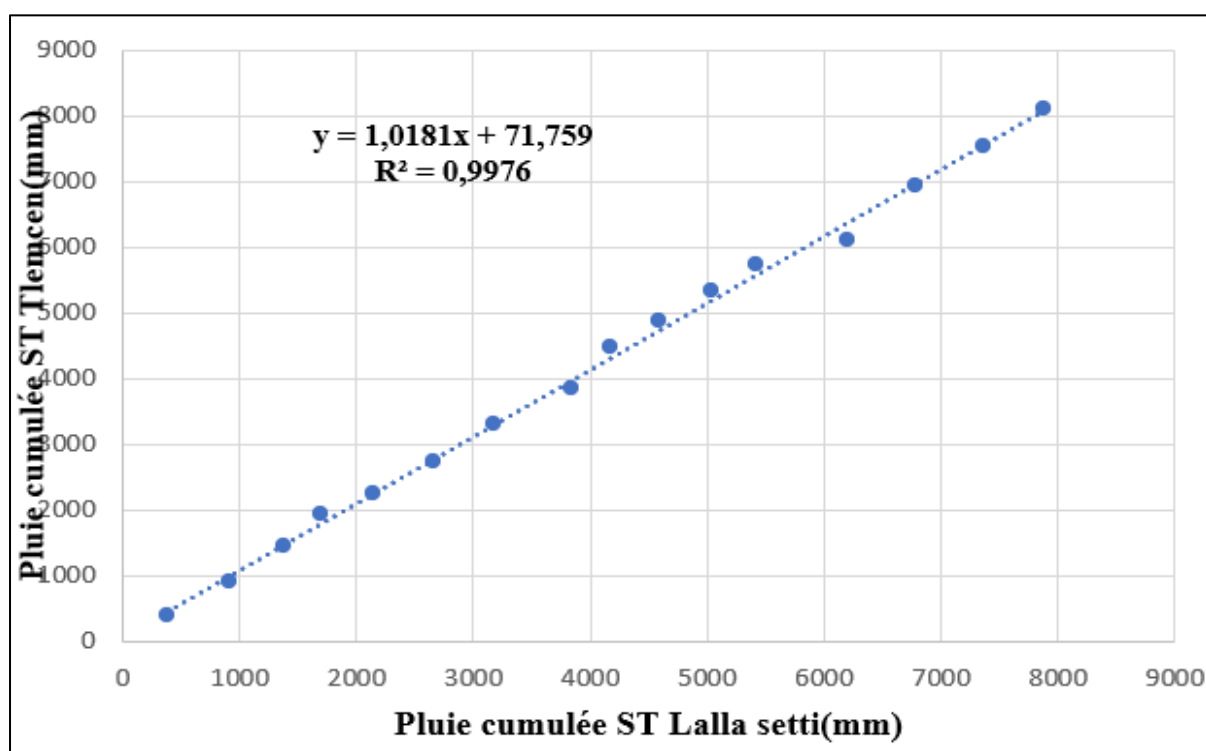


Figure III. 3: Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Lalla Setti et Tlemcen

En général. Nous observons que l'alignement des points d'observations est acceptable ; et la corrélation entre les données des stations Bensakrane et Tlemcen avec station Lalla setti est satisfaisante. Car le coefficient de corrélation est très élevé.

Tableau III 2: Paramètres de corrélation entre deux différentes stations avec celle Lalla Setti

Station	Coefficient de corrélation (R2)	Droite de régression
Lalla setti / Bensakrane	0.9897	$Y=1.0861-182.77$
Lalla setti /Tlemcen	0.9976	$Y=1.0181x+71.759$

III.3 Variation interannuelle de la pluviométrie :

Pour la détermination de la variation interannuelle de pluviométrie pour chaque station du bassin de l'oued Isser Sikkak nous avons utilisé comme paramètres statistiques la moyenne annuelle. Les stations étant suffisamment bien réparties et les valeurs des précipitations annuelles aux stations étudiées étant presque égales on a donc retenu la méthode de la moyenne arithmétique. C'est ce que montre le calcul de la moyenne des pluies annuelles de ces stations étant le coefficient d'immodération défini au niveau du rapport de valeurs de précipitations extrêmes (PM/Pm) présentes dans le tableau (III-3). (Iratni Nawel.2014)

Tableau III 3: Caractéristiques de la précipitation annuelle des stations pluviométriques du bassin de l'oued Isser Sikkak

Stations	Moyenne (mm)	Max (PM)(mm)	Min (Pm) (mm)	Nbre d'années >moy	PM/ Pm
Lalla setti	492.14	781.60	325.70	8	2.39
Bensakrane	516.10	680.42	329.72	15	2.06
Tlemcen	505.09	817.30	338.80	7	2.41

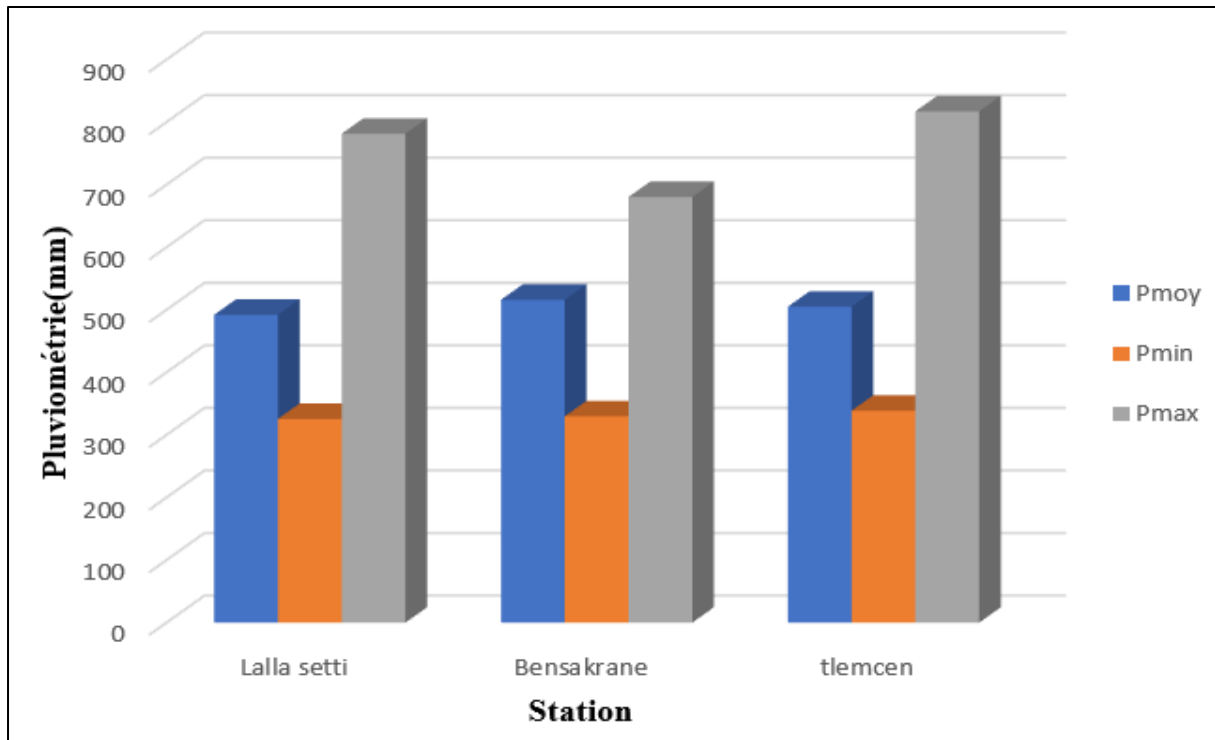


Figure III.4: Précipitation moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'oued Isser Sikkak

Les moyennes annuelles de la précipitation pour différentes stations du bassin de l'oued Isser Sikkak. Comme le montre la figure ci-dessus (III-4) sont égaux. On a presque les mêmes valeurs pour la station de Lalla Setti, Bensakrane et Tlemcen car elles sont proches. Le coefficient d'immodération (PM/Pm) est petit. Ce qui indique à une régularité interannuelle de pluviométrie. Donc on peut dire que la répartition de la pluie dans notre bassin est plus ou moins homogène. (Iratni Nawel.2014)

III.4 Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles :

➤ Variations temporelles :

L'analyse de l'évolution des valeurs annuelles de la pluie au cours de la période de 2004/2005-2019/2020 a donné les résultats suivants :

- ❖ Des années de basse précipitation sont remarquées dans station Tlemcen et Lalla setti pour les années 2003/04.2004/05et 2006/2007 et d'autres de haute précipitation sont remarqués dans les années2000/01.2002/03 2008/09 et2009/2010.

- ❖ Des années de basse précipitation sont remarquées pour station Bensakrane les années 2014/15.2015/16et 2016/17 et d'autres de haute précipitation sont remarqués dans les années 2007/08.2009/10 et 2012/2013.
- ❖ Une année extrêmement sèche est observée en 1998/1999où la précipitation descend à 325.7mm pour la station de Lalla Setti et dans station Bensakrane en 2019/2020 ou la précipitation descend à 329.72mm. D'autres part. une autre extrêmement humide en 2007/2008 où la précipitation atteint 817.3. 781.6mm et 661.26pour les stations de Tlemcen. Lalla setti et de Bensakrane.

L'analyse des paramètres statistique des trois distributions a permis de remarquer que les coefficients de variation des séries pluviométriques sont faibles (tableau III-5).

Tableau III.4: Paramètres statiques des pluies d bassin

Station	Période	Moyenne (mm)	Max (mm)	Min(mm)	Ecart type	Coefficient de Variation
Lalla setti	1996-2011	492.14	781.60	325.70	119.68	0.2431
Tlemcen	1996-2011	505.09	817.30	338.80	122.99	0.243
Bensakrane	2005-2020	516.10	680.42	329.72	108.29	0.2098

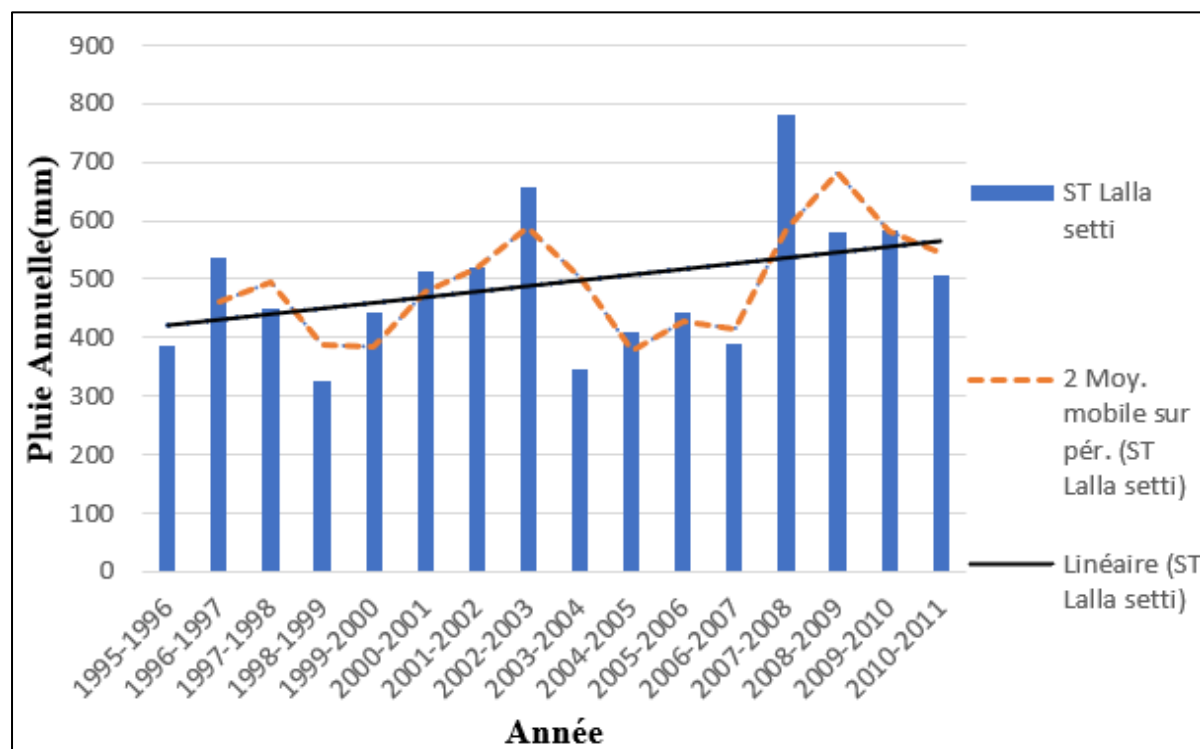


Figure III.5: Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station Lalla Setti

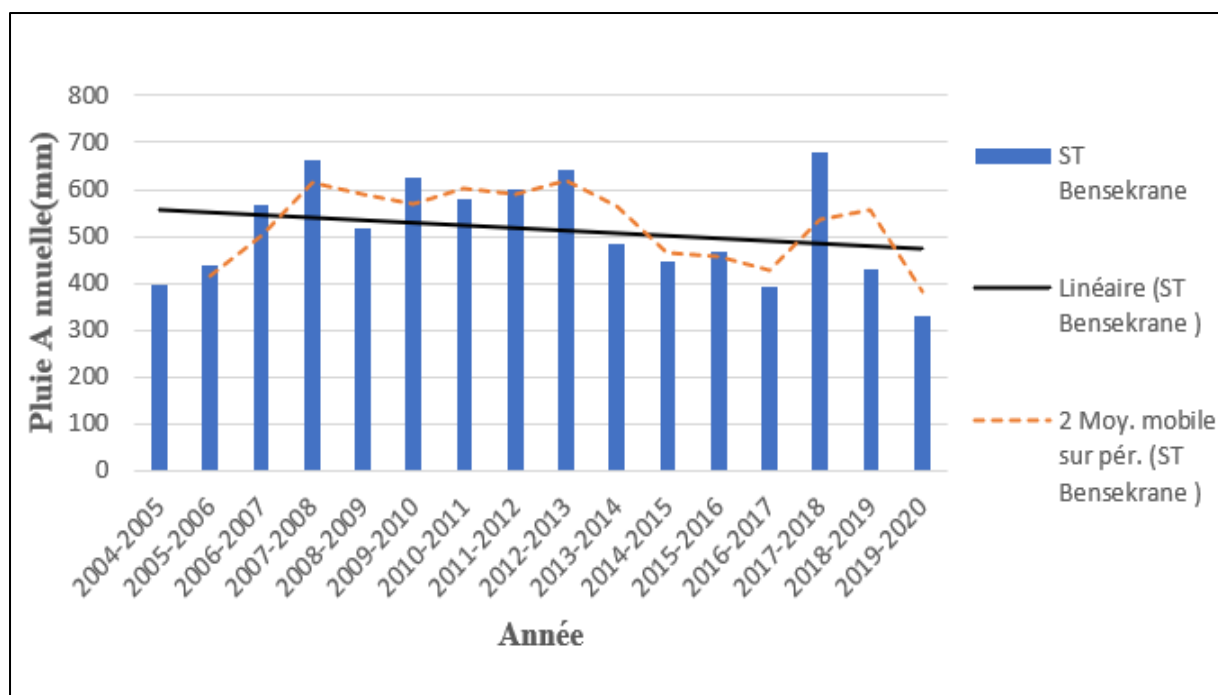


Figure III. 6: Variation interannuelle des précipitations annuelles de station Bensakrane

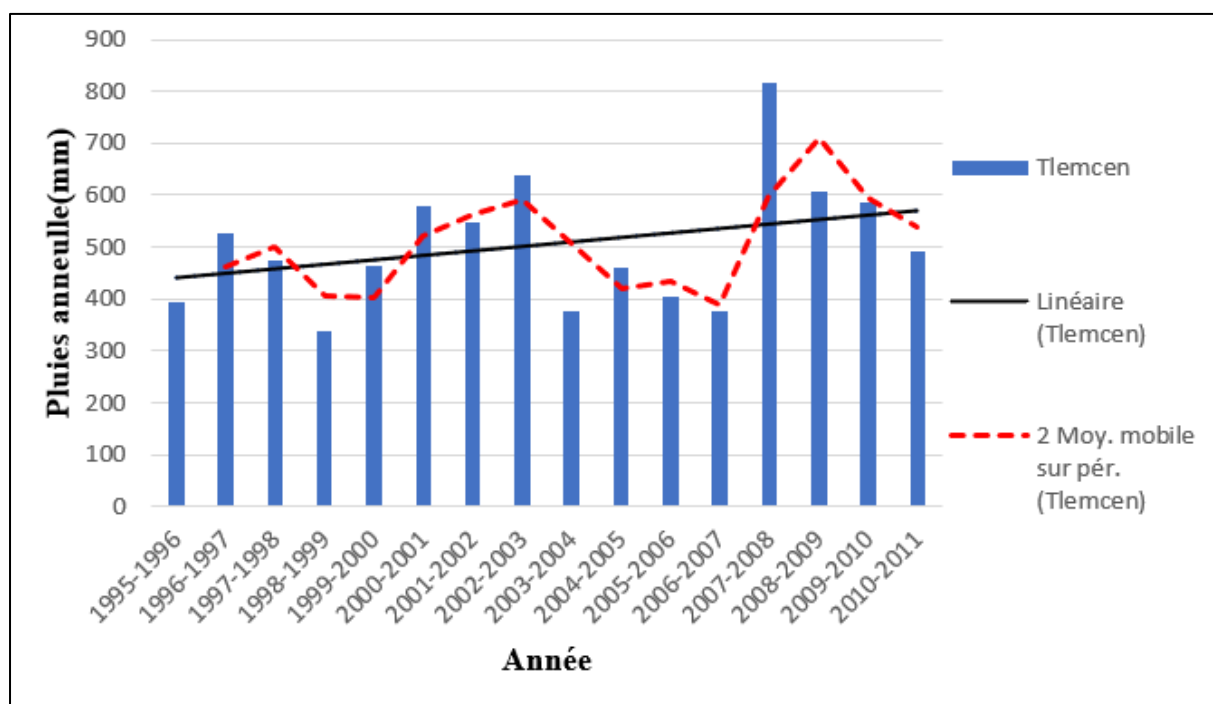


Figure III.7: Variation interannuelle des précipitations annuelles de station Tlemcen

D'après la figure (III.5. III.6 et III.7).

L'étude des précipitations annuelles des deux stations a montré une grande variabilité spatiale des moyennes pluviométriques où Tlemcen reçoit plus de pluie que Lalla Setti. A titre

d'exemple. La moyenne annuelle de 2007/2008 est de 817.3mm à station de Tlemcen et 781.6mm à Lalla Setti.

L'étude des précipitations annuelles de station Bensakrane a montré une grande variabilité spatiale de moyenne pluviométrique où Bensakrane reçoit maximum pluviométrie a été observé durant l'année de 2017/2018 de 680.42mm.

L'analyse des paramètres statistiques des deux distributions. Représentés sur le tableau (III.4). A permis de remarquer que les coefficients de variations des séries pluviométriques sont faibles.

III.5 Hypothèse de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique utilisée pour prédire la survenue d'événements futurs en étudiant des événements passés d'un processus particulier tel que celui hydrologique. Elle commence par évaluer la qualité des séries de données en utilisant des tests de stationnarité d'indépendance et d'homogénéité notamment ceux de Kendall, Wald-Wolfowitz. Ces tests visent à valider ou rejeter une hypothèse nulle (H_0) en fonction des observations. L'acceptation de H_0 indique une répartition aléatoire tandis que son rejet suggère des informations non aléatoires nécessitant une analyse plus approfondie. Les résultats des tests se présentent généralement sous la forme d'un couple comprenant les statistiques de test et la p-value cette dernière étant comparée à un niveau de signification. (Ali Hachemi.2017)

III.5.1 Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz

Le test de Wald-Wolfowitz est utilisé pour évaluer l'indépendance et pour détecter les tendances dans un échantillon. Ce test est de rang. C'est-à-dire qu'il ne repose sur aucune hypothèse de provenance de l'échantillon lié à une loi sous-jacente (par exemple la loi normale). (MARIO Haché.1993)

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n \dots \dots \dots (III.1)$$

Quand les éléments de l'échantillon sont indépendants. R suit une distribution normale de moyenne $\bar{R}$ et de variance $\text{Var}(R)$:

$$\bar{R} = \frac{(S_1^2 - S_4)}{n-1} \dots \dots \dots (III.2)$$

$$Var(R) = \frac{(S_1^2 - S_4)}{n-1} - \bar{R}^2 + \frac{(S_1^4 - 4S_1^2 S_4 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4)}{(n-1)(n-2)} \dots \dots \dots (III.3)$$

$$U = \frac{R - \bar{R}^2}{\sqrt{Var(R)}} \dots \dots \dots (III.4)$$

a un seuil d'importance α . ce qui implique que si $u \leq u_{\alpha/2}$ ou $u \geq u_{1-\alpha/2}$ il ne faut pas rejeter l'hypothèse H_0 . Dans le cas contraire. On rejette H_0 pour un tel seuil et par conséquent. H est acceptée. (Ali hechemi.2017)

III.5.2 Test de MANN – KENDALL

Ce test appartient à la catégorie des tests non paramétriques. Il remplace la série de valeurs par la série de rangs pour établir le seuil significatif d'un effet tendanciel.

Soit la série X_i . i varie de 1 an on calcule pour chaque élément le nombre d'éléments antérieurs au rang considéré qui lui sont inférieurs cette somme est appel t . plus t est grand plus l'organisation de la série est importante.

La variable t est distribué selon la loi normale.

$$(t) = \sum_{i=0}^n n_i \dots \dots \dots (III.5)$$

La moyenne et la variance sont données respectivement par les formules si après

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \dots \dots \dots (III.6)$$

$$Var(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \dots \dots \dots (III.7)$$

Si on détermine la probabilité (α 1) a l'aide de la table de la loi normale centrée réduite tel que :

$$\alpha = p(|U| > U(t)) \dots \dots \dots (III.8)$$

Avec :

$$U(t) = \frac{[t - E(t)]}{\sqrt{Var(t)}} \dots \dots \dots (III.9)$$

On retient ou on rejette l'hypothèse nulle (absence de tendance significative) au seuil α_0 selon que $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$; on conclut à une tendance croissante ou décroissante suivant la positivité ou négativité de $U(t)$.

Dans le cas d'une tendance significative. Les deux courbes progressives et rétrograde permettent de situer approximativement la date du début de cette tendance. (Belarbi Fadila.2018)

III.6 Vérification des hypothèses de base pour les précipitations

Journalières maximales par le logiciel Hyfran Plus :

III.6.1 Test de Wald-Wolfowitz et Mann Kendall:

Le logicielle HYFRAN Plus a pour fonction de réaliser une analyse fréquentielle complète pour n'importe quelle variable pour laquelle on dispose d'observations indépendantes (absence d'auto-corrélation) et identiquement distribuées (stationnarité et indépendance).

L'étude de l'indépendance et de la stationnarité des séries précède donc l'ajustement de la distribution des séries de pluies journalières maximales. Les tests statistiques de stationnarité (Kendal) et d'indépendance (Wald-Wolfowitz) sont appliqués à chaque série exploitée. Le respect des conditions d'indépendance et de stationnarité requises par la méthodologie de l'analyse fréquentielle s'assure ainsi de l'invalidation de l'hypothèse d'indépendance et de stationnarité. L'hypothèse d'indépendance a été validée grâce au test de Wald-Wolfowitz. Les résultats des tests d'hypothèses pour les précipitations journalières sont présentés dans le tableau (III.5). (ARACHI Khadra 2025)

Tableau III.5: Résultats des test statiques appliqués aux précipitations journalières maximales du bassin versant Isser Sekkak

Séries journalières	Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)		Test stationnarité (Mann Kendall)	
	U	P	K	P
	Stations pluviométriques			
Lalla setti (1990/2016)	1.96	0.0505	0.625	0.532
Tlemcen (1994/2016)	1.790	0.07352	1.558	0.1192
Bensakrane (1990/2019)	1.128	0.2593	1.820	0.0688

Station Lalla Setti

Les résultats pour la série journalière du test de stationnarité (Kendall) sont la statistique $|K| = 0.625$ et la p-value $= 0.532$. Une p-value élevée confirme qu'on accepte H_0 . Il n'existe

aucune tendance significative. La série est stationnaire en tendance. Pour la série journalière. Les valeurs du test d'indépendance (Wald-Wolfowitz) sont la statistique $|U| = 1.96$ et la p-value $= 0.505$. La p-value > 0.05 indique que l'on accepte H_0 . Donc le test indique que la série est indépendance qui confirme l'absence de corrélation temporelle entre les observations et permet l'application de l'analyse fréquentielle.

Station Tlemcen

Les résultats pour la série journalière du test d'indépendance (Wald-Wolfowitz) sont la statistique $|U| = 1.790$ et p-value $= 0.07352$. La p-value est bien > 0.05 , donc on accepte H_0 . Donc le test indique que la série est indépendance qui confirme l'absence de corrélation temporelle entre les observations et permet l'application de l'analyse fréquentielle. Pour le test de stationnarité (Kendall). La statistique $|K| = 1.558$ et la p-value $= 0.1192$. La p-value élevée confirme que la série journalière ne présente pas de tendance significative et la série est donc stationnaire en tendance.

Station Bensakrane

Les résultats pour la série journalière du test d'indépendance (Wald-Wolfowitz) sont la statistique $|U| = 1.128$ et p-value $= 0.2593$. La p-value est bien > 0.05 , donc on accepte H_0 . Donc le test indique que la série est indépendance qui confirme l'absence de corrélation temporelle entre les observations et permet l'application de l'analyse fréquentielle. Pour le test de stationnarité (Kendall). La statistique $|K| = 1.820$ et la p-value $= 0.0688$. La p-value élevée confirme que la série journalière ne présente pas de tendance significative et la série est donc stationnaire en tendance.

III.6 .2 Test d'ajustement par les critères Aic. Bic

L'adéquation aux lois probabilistes utilisées a été testée par les deux critères de comparaison. Le BIC (critères d'information bayésien) et l'AIC (critères d'information Akaike). Ces deux critères (BIC et AIC) permettent de construire un classement de modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs. (ketrouci k 2004)

La valeur des critères d'information d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC) pour une loi de probabilité donnée dépend d'un calcul de la log-vraisemblance maximisée sur un échantillon.

Akaike a défini l'AIC pour évaluer la qualité d'un modèle ajusté cherchant à minimiser la perte d'information. Le modèle optimal est celui avec la valeur minimale de l'AIC mais ce critère à lui seul ne suffit pas pour sélectionner un modèle. Ainsi le BIC qui est une généralisation bayésienne de l'AIC est utilisé conjointement. Le BIC vise à maximiser la probabilité a posteriori d'un modèle et de la même manière que l'AIC privilégie la parcimonie en désignant le modèle avec la valeur minimale comme le meilleur. (kouassi Michel.2021)

Les résultats des critères de (BIC et AIC) penchent en faveur la loi Log normale et gumbel pour pratiquement l'ensemble des stations (III.6)

Tableau III.6: Comparaison critères Aic. Bic

Station	Loi d'ajustement	AIC	BIC
Lalla setti	Log normal	240.867	238.275
	Gumbel	241.764	239.172
	GEV	244.527	240.639
Tlemcen	Log normal	214.867	212.596
	Gumbel	214.679	212.408
	GEV	217.697	214.291
Bensakrane	Log normal	253.449	250.646
	Gumbel	254.382	251.579
	GEV	258.551	254.347

NB : Le choix de la distribution repose sur la plus faible valeur des critères AIC et BIC

III.7 Vérification de la qualité d'ajustement des lois statistiques par logiciel Hydrognomon

III.7.1 Test de Khi deux

Le test de χ^2 à été effectué à l'aide de logiciel Hydrognomon qui est un logiciel pour l'analyser et traiter les données hydrologiques sous forme des séries chronologiques. À l'issue duquel le programme peut réaliser des applications hydrologiques spécifiques. Ce logiciel Hydrognomon peut ajuster un important nombre de lois statistiques à une série de données qui obey les hypothèses d'indépendance d'homogénéité et de stationnarité. (Bouchera Merah.2021)

Le test de χ^2 est appliqué pour vérifier l'ajustement d'un échantillon à une loi théorique. Pour appliquer le test Khi-deux. La procédure est la suivante. Soit un échantillon de « n » valeurs classées dans l'ordre croissant (ou décroissant) et pour lequel une loi de répartition F

(x) a été établie. L'échantillon est réparti dans un certain nombre « k » de classes contenant chacune « ni » valeurs expérimentales. Le nombre « vi » correspond au nombre théorique de valeurs affectées à la classe i par la loi de répartition. Celui-ci est donné par (équation III-10).

$$Vi = n \int_{xi+1}^{xi} f(x) dx = n[F(xi) - F(xi + 1)] \dots \dots \dots (III.10)$$

Avec : f (x) la fonction densité de probabilité correspondant à la loi théorique.

L'expression de χ^2 expérimental est présentée comme suit (équation III-11)

$$X^2 = \sum \frac{(ni-vi)^2}{vi} \dots \dots \dots (III.11)$$

La probabilité de dépassement correspondant au nombre de degré de liberté λ est définie (avec $\lambda = k - 1 - np$. np étant le nombre de paramètres de la loi F (x)). Si cette probabilité est supérieure à 0.05. L'ajustement est satisfaisant. Dans le cas inverse on rejette la loi. Ce test indique si le paramétrage est compatible avec les données mais ne permet pas de trancher sur le choix de la loi la plus appropriée. (Kouassi Mchel.2021)

III.7.2 Test de Kolmogorov

Le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV a pour but de mesurer pour une variable continue l'écart maximal entre la fréquence « théorique » F_0 (jc) et la fréquence expérimentale $f(x)$. À l'origine c'est un test de conformité et non pas un test d'ajustement : il s'agit bien de vérifier si une distribution expérimentale peut être considérée comme identique à une distribution de référence qui est connue a priori.

$H_0 : F(x)=F_0(x). \forall x ;$

Test bilatéral : $H_1 : F(x) \neq F_0(x)$. Pour au moins une valeur x ;

Tests unilatéraux : $H_1 : F(x) > F_0(x)$ ou $F(x) < F_0(x)$. Pour au moins une valeur x.

Ce test est généralement utilisé en version bilatérale. (Sekheri. Meskine.2020)

❖ Résultats des tests

Tableau III.7: Résultats de test khi deux X^2 des stations

Station	Loi d'ajustement	$\alpha=5\%$	Test de khi deux (Attained α)	X^2
Lalla Setti	Log normal	Accept	73.8883%	0.111
	Gumbel	Accept	73.8883%	0.111
	GEV	Accept	40.1542%	0.703
Tlemcen	Log normal	Accept	48.921%	0.4782
	Gumbel	Accept	36.340%	0.826
	GEV	Accept	13.646%	2.2173
Bensakrane	Log normal	Accept	18.887%	3.333
	Gumbel	Accept	18.8876%	3.333
	GEV	Accept	5.551%	3.666

NB : Le choix de la distribution repose sur la plus faible valeur de la statistique de X^2 (ou la valeur max de attained p -value) parmi les lois les plus acceptées au seuil de 5% indiquant le meilleur ajustement aux données

Tableau III. 8 : Résultats de test Kolmogorov des stations

Station	Loi d'ajustement	$\alpha=5\%$	Test kolmogorov (Attained α)	D
Lalla Setti (1990/2016)	Log normal	Accept	96.201	0.0879
	Gumbel	Accept	97.541	0.0834
	GEV	Accept	94.382	0.0926
Tlemcen (1994/2016)	Log normal	Accept	99.952	0.0637
	Gumbel	Accept	99.977	0.06062
	GEV	Accept	99.974	0.0610
Bensakrane (1990/2019)	Log normal	Accept	86.255%	0.102
	Gumbel	Accept	89.479	0.0978
	GEV	Accept	84.834%	0.104

NB : Le choix de la distribution repose sur la plus faible valeur de la statistique de D (ou la valeur max de attained p -value) parmi les lois les plus acceptées au seuil de 5% indiquant le meilleur ajustement aux données

Interprétation des résultats

Cas de la station de Lalla Setti

Les tests d'ajustement ont montré des résultats légèrement divergents. Le test de kolmogorov suggère la loi Gumbel comme la plus adaptée tandis que les critères AIC.BIC suggère la loi de log normal et le test de khi deux privilégient la loi de log normale ou Gumbel.

Bien que la loi log normal présente les meilleures performances selon les critères AIC et BIC. La loi de gumbel a été retenue pour l'analyse des pluies maximales. Ce choix s'explique par le fait que cette loi spécifiquement adaptée à la modélisation des valeurs extrêmes ce qui est essentiel pour l'estimation des pluies de forte intensité et par conséquent pour le calcul des débits de crue. Ainsi l'analyse des quantiles de pluie pour différents période de retour montre que la loi se gumbel fournit des valeurs plus élevées que la loi log normal pour les grandes périodes de retour 50 et 100 ans. Ainsi elle permet une meilleure prise en compte des événements extrêmes ce qui est essentielle pour le dimensionnement des ouvrages hydraulique

Cas de la station de Tlemcen

Les tests d'ajustement ont montré des résultats légèrement divergents. Le test de Khi deux suggère la loi log normal comme la plus adaptée tandis que les critères AIC.BIC et le test de Kolmogorov privilégient la loi de Gumbel. Étant donné que la loi de Gumbel est validée par plusieurs critères et quelle constitue un cas particulier de la loi de Log normal elle a été retenue comme modèle final pour la modélisation des pluies journalières max de la zone d'étude.

Cas de la station de bensekrane

Les résultats des tests d'ajustement révèlent une concordance entre les méthodes utilisées. En effet. Le test de kolmogorov indique que la loi Gumbel offre le meilleur ajustement ainsi les critères AIC. BIC indique la loi de log normal est la plus adaptée et le test de khi deux X^2 désignent la loi de log normal ou gumbel comme la plus appropriée. Étant donné que la loi de Gumbel est validée par la majorité des critères elle est retenue comme la distribution la plus représentative des données.

- ❖ D'après les analyses la loi Gumbel ou log normal est les plus adaptées pour représenter les précipitations journalières maximales des stations étudiées. Ce constat est en cohérence avec les conclusions d'études précédentes menées par Bouanani (2004). Belarbi (2010). Ketrouci(2014). (Iratni Nawel.2014) sur le même bassin versant (la Tafna) ce qui renforce l'efficacité de cette distribution pour l'analyse fréquentielle des pluies journalières max dans cette région.

III.8 Ajustement des pluies maximales journalières

Parmi aux cinq lois ou modèles statistiques les plus utilisés on a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel (doublement exponentielle). Galton (log normale) et GEV à l'aide de logiciel Hyfran Plus avec une comparaison des graphes des droites de régression obtenues par les ajustements (figure (III-8). (III-9) (III-10)). Le tableau (III-9) donne les différentes caractéristiques statistiques de l'échantillon pour les différentes stations considérées et pour l'ensemble des stations représentant le secteur d'étude.

Tableau III.6: Les paramètres statiques des pluies maximales journalières

Statistiques de base	St Lalla setti (1990/2016)	St Tlemcen (1994/2016)	St Bensakrane (1990/2019)
Nombre de données	27	23	30
Minimum	25	11.4	21.40
Maximum	123	119.6	82.20
Moyenne	50.9	50.23	42.05
Ecart-type	21.8	25.84	17.11
Médiane	48.5	45.70	37.40
Coeff. De variation (Cv)	0.428	0.5144	0.4069
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.41	1.21	0.9239
Coeff. D'aplatissement (Ck)	5.10	3.577	2.463

III.8.1 Comparaison Graphique

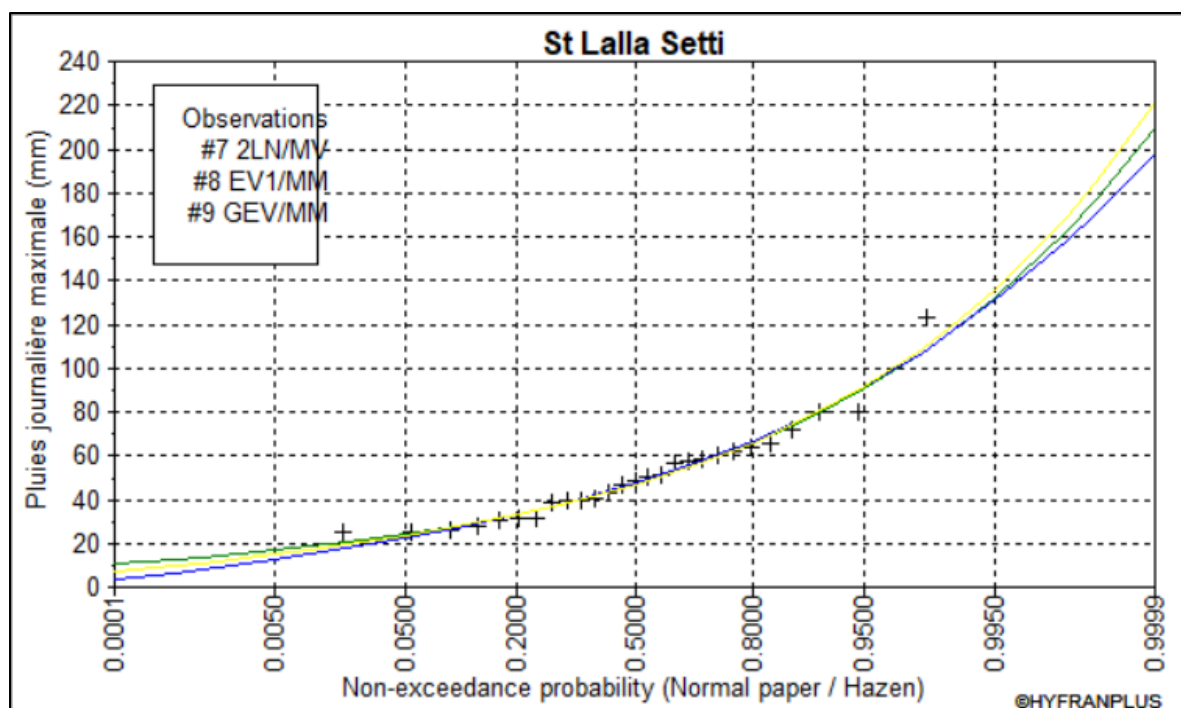


Figure III.8: Ajustement comparatif des trois lois de la station Lalla setti

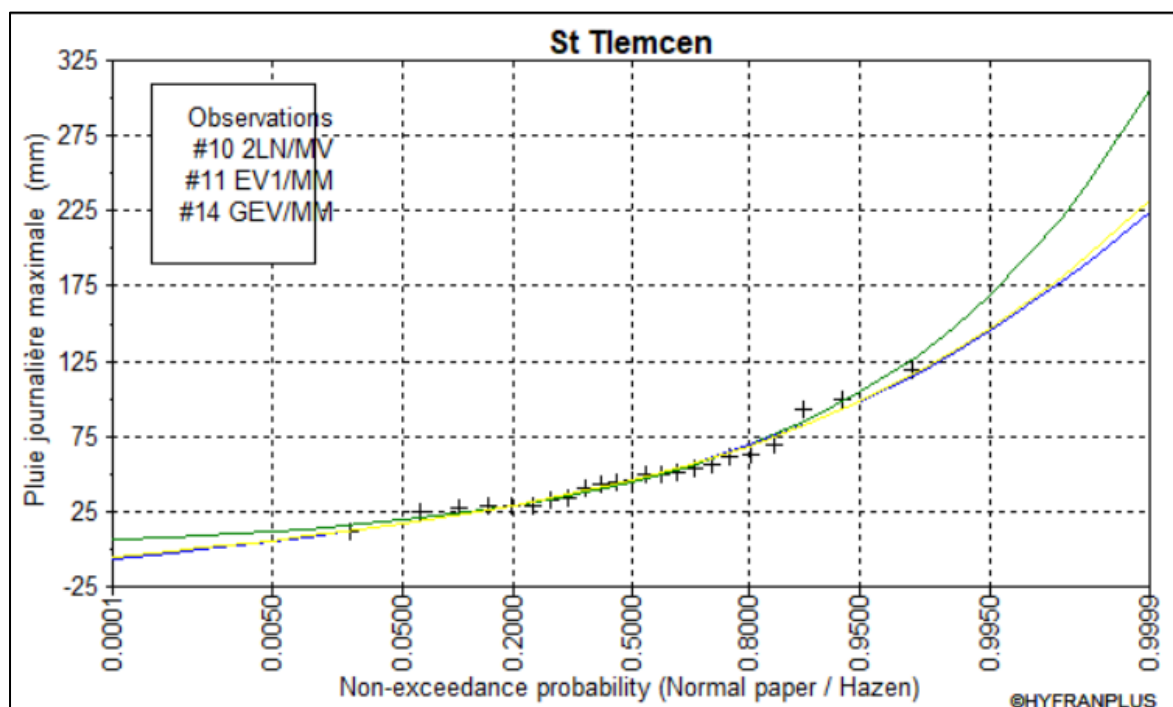


Figure III.9: Ajustement comparatif des trois de la station Tlemcen

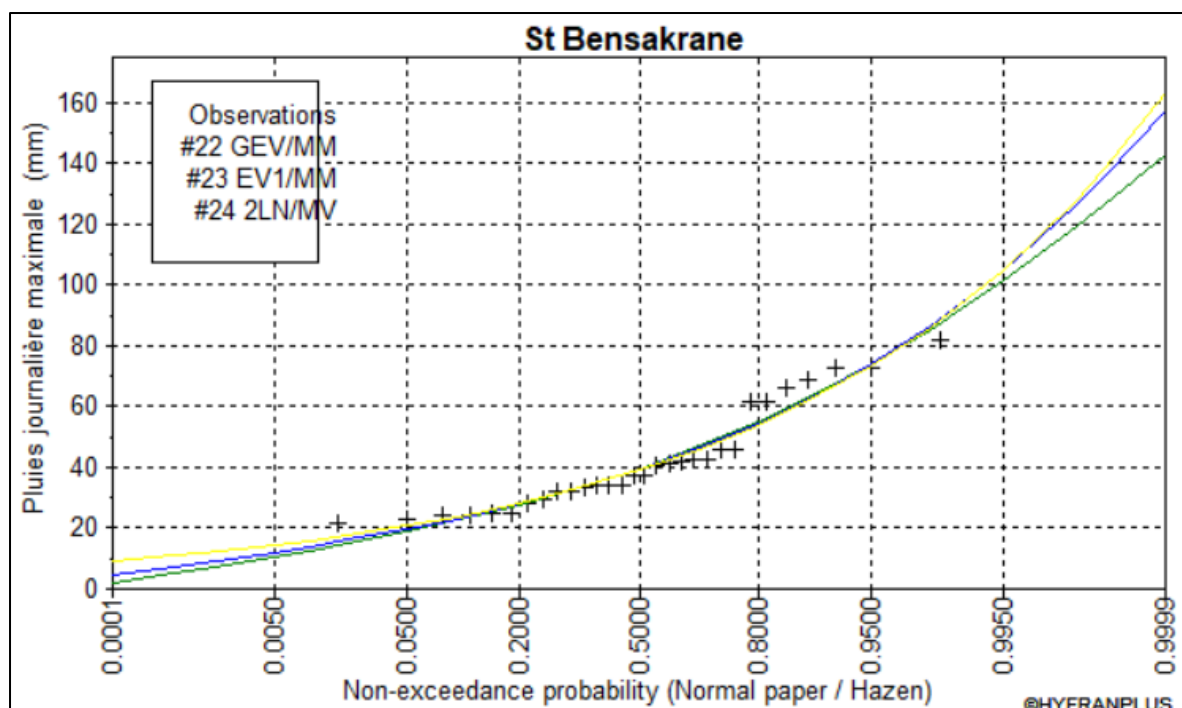


Figure III.10: Ajustement comparatif des trois lois de la station Bensakrane

III.8.2 Ajustement de la pluie maximale à la loi de probabilité de Gumbel

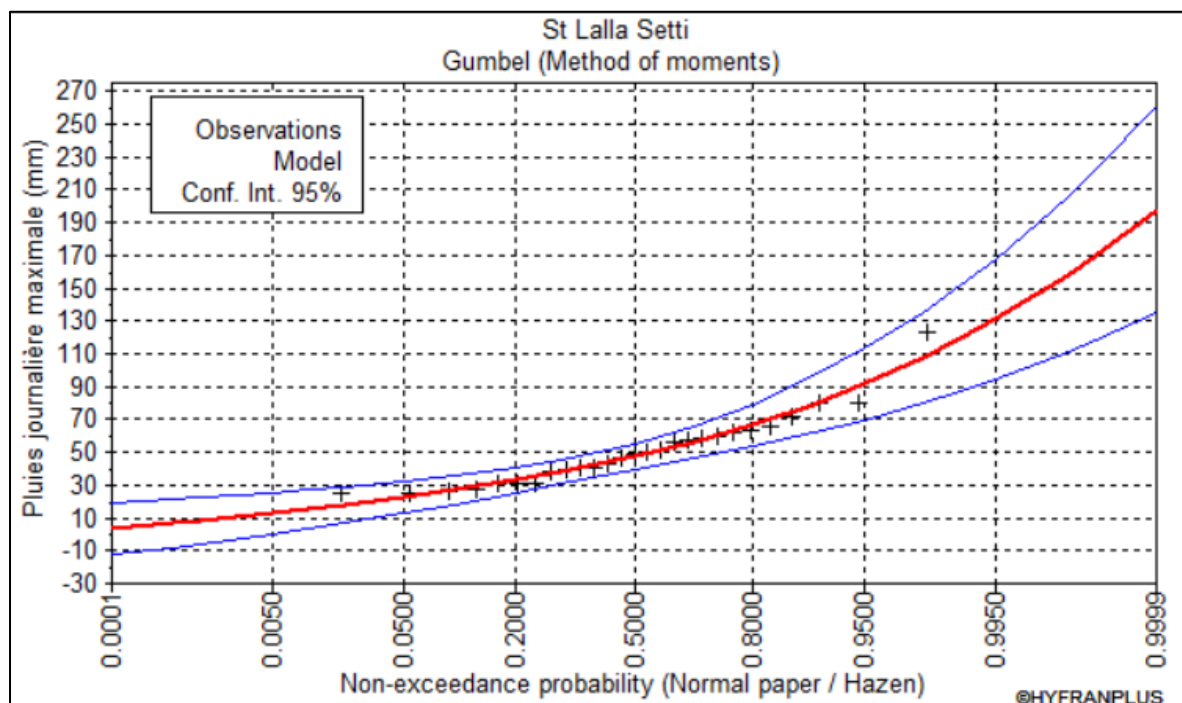


Figure III.11: Ajustement à loi de Gumbel de la station Lalla setti

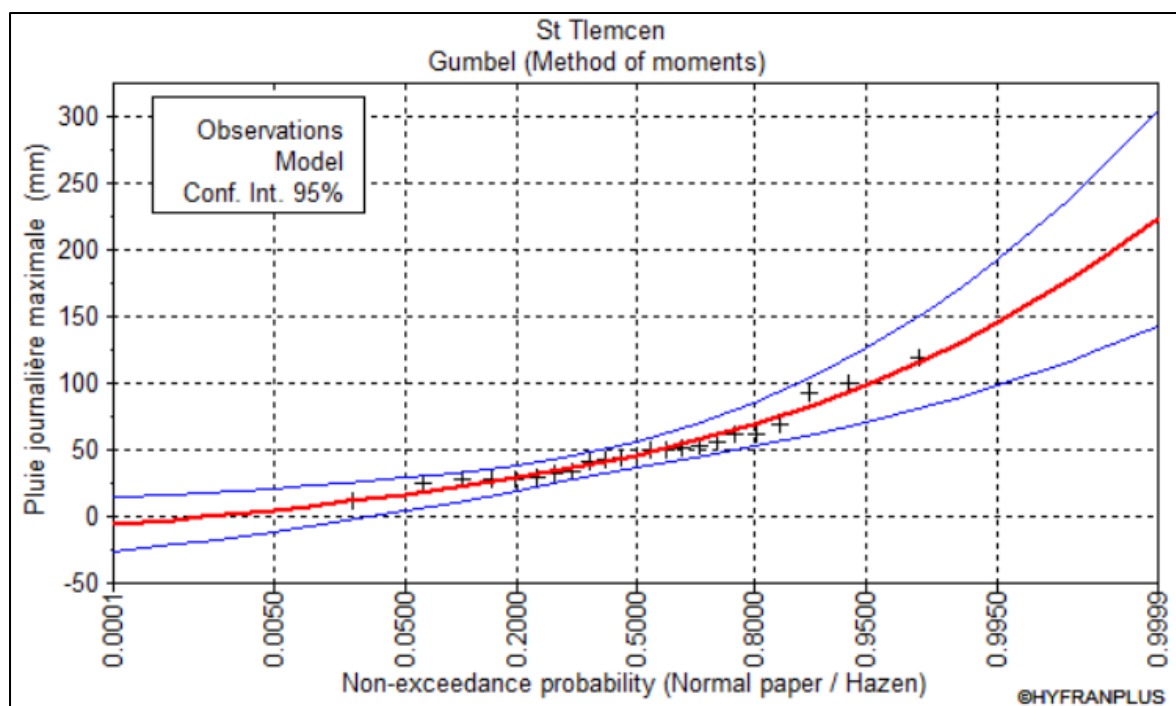


Figure III.12: Ajustement à la loi Gumbel de la station Tlemcen

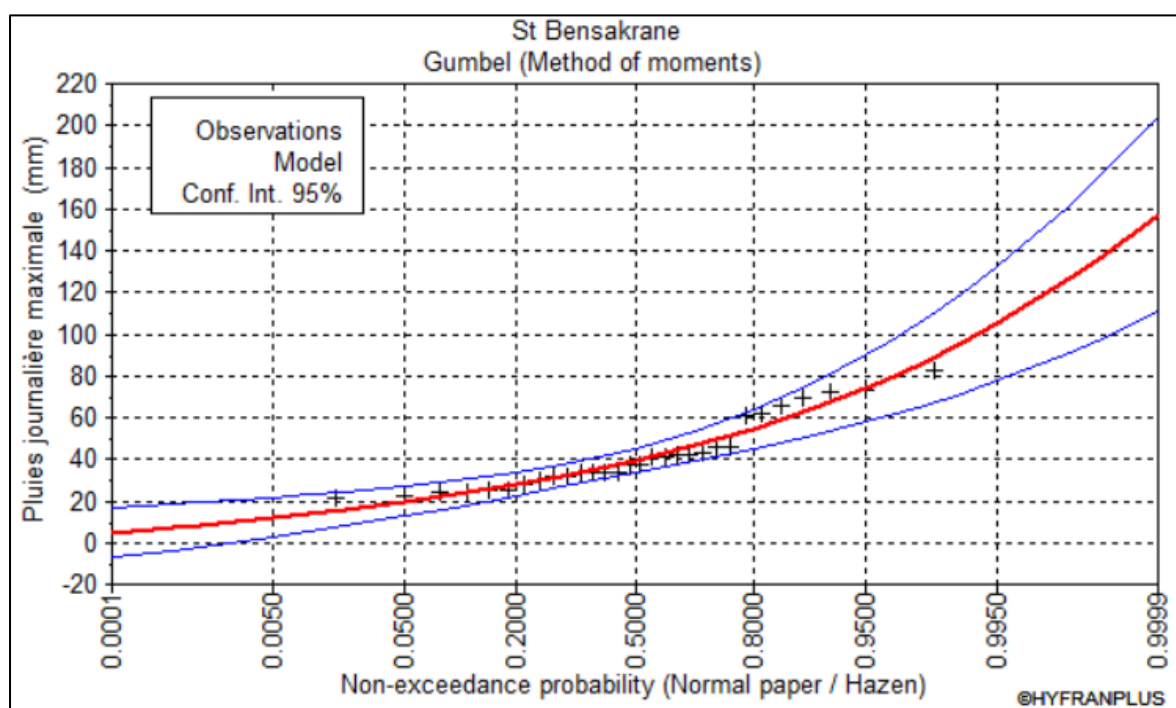


Figure III.13: Ajustement à la loi de Gumbel de la station Bensakrane

Les résultats de l'ajustement de la pluie journalière maximale sont regroupés dans les tableaux (III-10). (III-11). (III-12).

Tableau III.7: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station Lalla Setti

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	79.3	91.5	95.3	107	119
Ecart-type	8.75	11	11.8	14.1	16.4
Int.Conf	62.1-96.4	69.8-113	72.2-118	79.6-135	86.9-151

Tableau III.8: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station Tlemcen

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	83.95	98.45	103.1	117.2	131.3
Ecart-type	11.25	14.21	15.17	18.15	21.14
Int.Conf	61.89-106	70.59-126.3	73.32-132.8	81.64-152.8	89.84-172.7

Tableau III.9:Caratéristique de la pluie journalière maximale de la station Bensakrane

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	64.37	73.98	77.02	86.41	95.72
Ecart-type	6.52	8.239	8.794	10.52	12.26
Int.Conf	51.59-77.16	57.83-90.13	59.78-94.26	65.78-107	71.69-119.8

III.9 Précipitations de courte durée

Les précipitations de courte durée sont essentielles pour estimer les crues. Le calcul de ces pluies pour différentes fréquences a été réalisé grâce à la relation de Body. Dont la formule est la suivante :

$$P_t = P_{j_{\max\%}} \left(\frac{t}{24} \right)^b \dots \dots \dots (III.12)$$

P_t : pluies de courte durée de fréquence donnée en (mm)

P_{j_{max}%}: Pluies journalière de fréquence donnée en (mm)

t: temps en heure.

b: exposant climatique calculé par la formule (III.13)

Les résultats sont donnés au tableau (III.13).

$$b = 1 + \frac{\ln(\frac{P_{jmax\ average}}{24}) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \dots \dots \dots (III.13)$$

L'intensité de pluies est donnée par la formule suivante :

$$It = \frac{Pt}{t} \dots \dots \dots (III.14)$$

Pjmax : Pluie journalière maximal (moyenne).

Tableau III.10:Exposant climatique de la station du bassin Isser sikkak

Station	Pjmax (mm)	Exposant climatique
Lalla setti (1990/2016)	50.9	0.363
St Tlemcen (1994/2016)	50.23	0.359
Bensakrane (1990/2019)	42.05	0.313

L'intensité et la pluie de courte durée correspondante à un pas de temps variable. Sont représentées pour les 2 stations et de différentes fréquences. dans les tableaux (III-14). (III-15) et (III-16).

Tableau III.11: Hauteur intensité durée fréquence de la station Lalla Setti

t(h)	pt(10)(mm)	it(mm /h)	pt(20)(mm)	it(mm /h)	pt(25)(mm)	it(mm /h)	pt(50)(mm)	it(m m/h)	pt(100)(mm)	it(mm /h)
0.2	15.13	60.50	17.45	69.81	18.18	72.71	20.41	81.6	22.70	90.79
5								4		
2	32.18	16.09	37.13	18.56	38.67	19.33	43.42	21.7	48.28	24.14
4	41.38	10.35	47.75	11.94	49.73	12.43	55.84	13.9	62.10	15.52
								6		
6	47.94	7.99	55.32	9.22	57.62	9.60	64.69	10.8	71.94	11.99
8	53.22	6.65	61.41	7.68	63.96	7.99	71.81	8.98	79.86	9.98
10	57.71	5.77	66.59	6.66	69.35	6.94	77.87	7.79	86.60	8.66
12	61.66	5.14	71.15	5.93	74.10	6.18	83.20	6.93	92.53	7.71
14	65.21	4.66	75.24	5.37	78.36	5.60	87.99	6.28	97.85	6.99
16	68.45	4.28	78.98	4.94	82.26	5.14	92.36	5.77	102.71	6.42
18	71.44	3.97	82.43	4.58	85.85	4.77	96.39	5.35	107.20	5.96
20	74.22	3.71	85.64	4.28	89.20	4.46	100.15	5.01	111.38	5.57
22	76.83	3.49	88.66	4.03	92.34	4.20	103.67	4.71	115.30	5.24
24	79.3	3.304	91.5	3.81	95.3	3.97	107	4.46	119	4.96

Tableau III.12: Hauteur intensité durée fréquence de la station Tlemcen

t(h)	pt(10)(mm)	it(mm /h)	pt(20)(mm)	it(mm /h)	pt(25)(mm)	it(mm /h)	pt(50)(mm)	it(m m/h)	pt(100)(mm)	it(mm /h)
0.25	16.31	65.23	19.12	76.50	20.03	80.11	22.77	91.1	25.51	102.1
2	34.40	17.20	40.34	20.17	42.25	21.13	48.03	24.0	53.81	26.90
4	44.12	11.03	51.74	12.94	54.19	13.55	61.60	15.4	69.01	17.25
6	51.04	8.51	59.85	9.98	62.68	10.45	71.25	11.9	79.82	13.30
8	56.59	7.07	66.36	8.30	69.50	8.69	79.00	9.88	88.51	11.06
10	61.31	6.13	71.90	7.19	75.29	7.53	85.59	8.56	95.89	9.59
12	65.46	5.45	76.76	6.40	80.39	6.70	91.38	7.62	102.38	8.53
14	69.18	4.94	81.13	5.79	84.96	6.07	96.58	6.90	108.20	7.73
16	72.58	4.54	85.11	5.32	89.13	5.57	101.32	6.33	113.51	7.09
18	75.71	4.21	88.79	4.93	92.98	5.17	105.70	5.87	118.42	6.58
20	78.63	3.93	92.21	4.61	96.57	4.83	109.77	5.49	122.98	6.15
22	81.37	3.70	95.42	4.34	99.93	4.54	113.60	5.16	127.26	5.78
24	83.95	3.50	98.45	4.10	103.1	4.30	117.2	4.88	131.3	5.47

Tableau III.13: Hauteur intensité durée fréquence de la station Bensakrane

t(h)	pt(10)(mm)	it(mm /h)	pt(20)(mm)	it(mm /h)	pt(25)(mm)	it(mm /h)	pt(50)(mm)	it(mm /h)	pt(100)(mm)	it(mm /h)
0.25	15.43	61.70	17.73	70.91	18.46	73.83	20.71	82.83	22.94	91.75
2	29.57	14.79	33.99	16.99	35.39	17.69	39.70	19.85	43.98	21.99
4	36.74	9.18	42.22	10.56	43.96	10.99	49.32	12.33	54.63	13.66
6	41.71	6.95	47.94	7.99	49.91	8.32	55.99	9.33	62.02	10.34
8	45.64	5.70	52.45	6.56	54.61	6.83	61.27	7.66	67.87	8.48
10	48.94	4.89	56.25	5.62	58.56	5.86	65.70	6.57	72.78	7.28
12	51.82	4.32	59.55	4.96	62.00	5.17	69.56	5.80	77.05	6.42
14	54.38	3.88	62.50	4.46	65.06	4.65	73.00	5.21	80.86	5.78
16	56.70	3.54	65.16	4.07	67.84	4.24	76.11	4.76	84.31	5.27
18	58.83	3.27	67.61	3.76	70.39	3.91	78.97	4.39	87.48	4.86
20	60.80	3.04	69.88	3.49	72.75	3.64	81.62	4.08	90.41	4.52
22	62.64	2.85	71.99	3.27	74.95	3.41	84.09	3.82	93.15	4.23
24	64.37	2.68	73.98	3.08	77.02	3.21	86.41	3.60	95.72	3.99

III.9.1 Les courbes IDF :

Ce sont des courbes statistiques établissant les relations entre les intensités entre les durées et entre la fréquence d'apparition des pluies. Elles donnent la probabilité qu'une intensité de pluie moyennée sur une durée donnée soit de retour en fonction d'une méthode de calcul référence de la méthode rationnelle. Elles se présentent surtout sous forme de courbes IDF que l'on élabore à partir de l'analyse de réseaux d'averses enregistrés au cours d'une longue période en un station. Les courbes IDF servent pour le calcul de l'intensité des pluies pour les différentes périodes de retour intensité qui interviendra dans la relation de la méthode rationnelle. (Bouchera Merah)

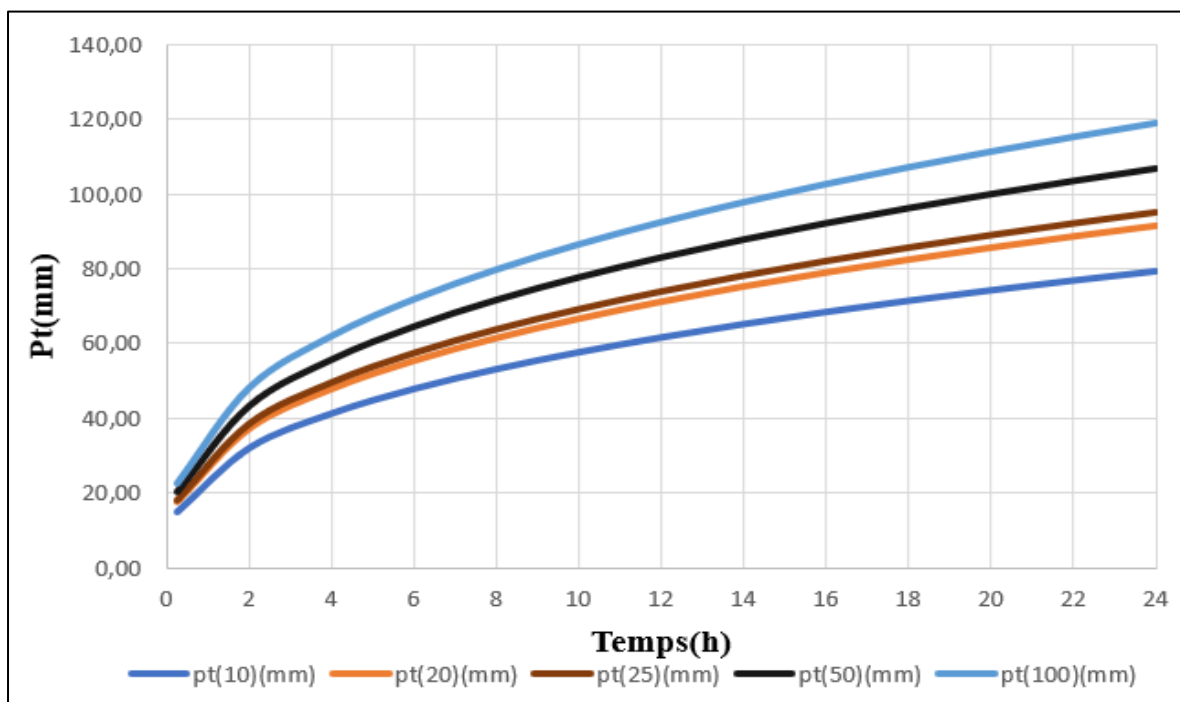


Figure III.14: Courbe des pluies à courte durée de la station Lalla Setti

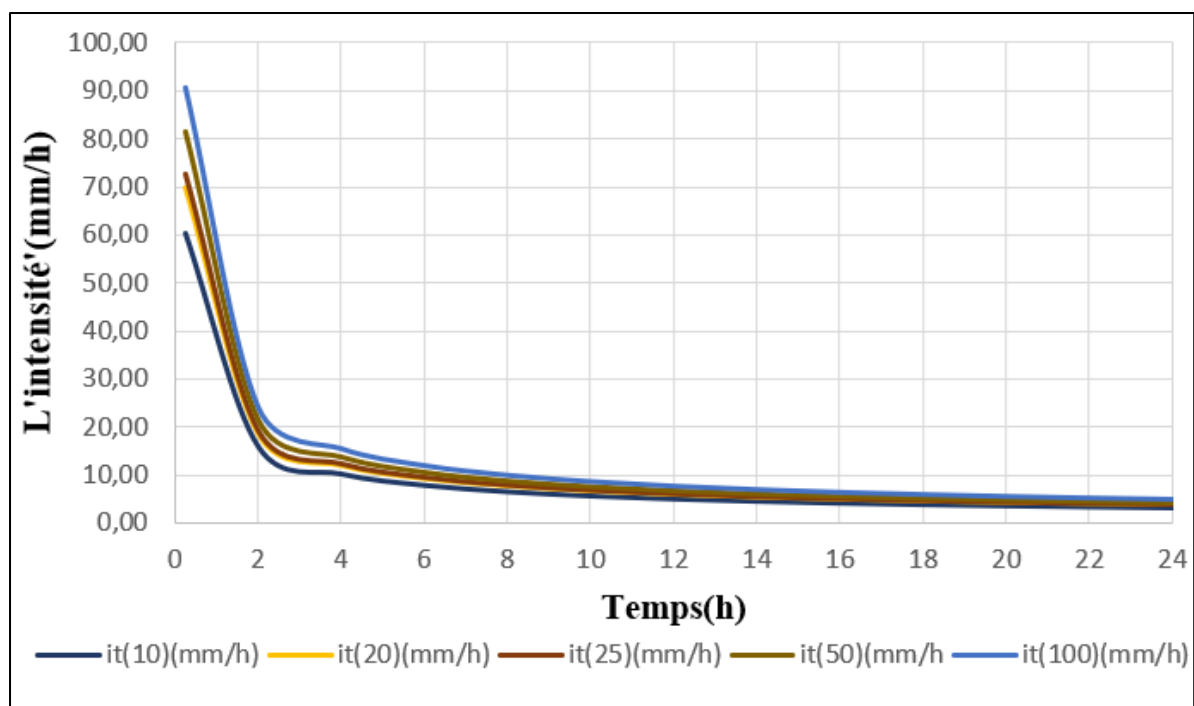


Figure III.15: Courbe IDF de la station Lalla Setti

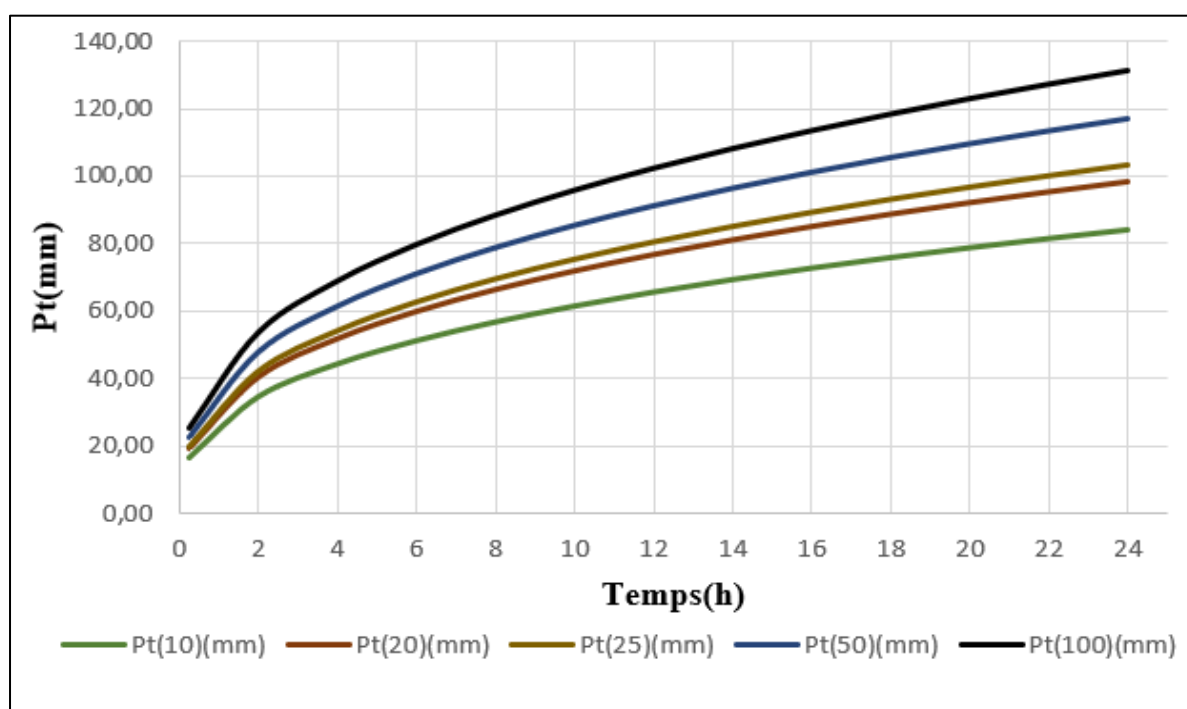


Figure III.16: Courbe des pluies à courte durée de la station Tlemcen

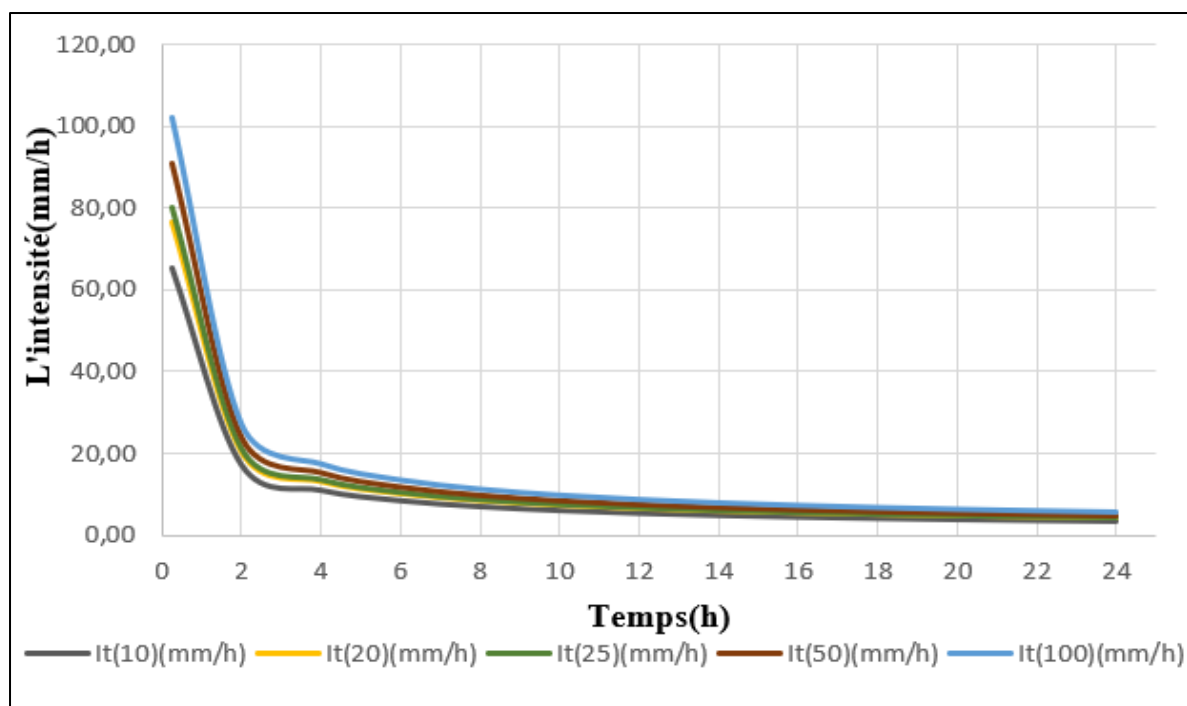


Figure III.17: Courbe IDF de la station Tlemcen

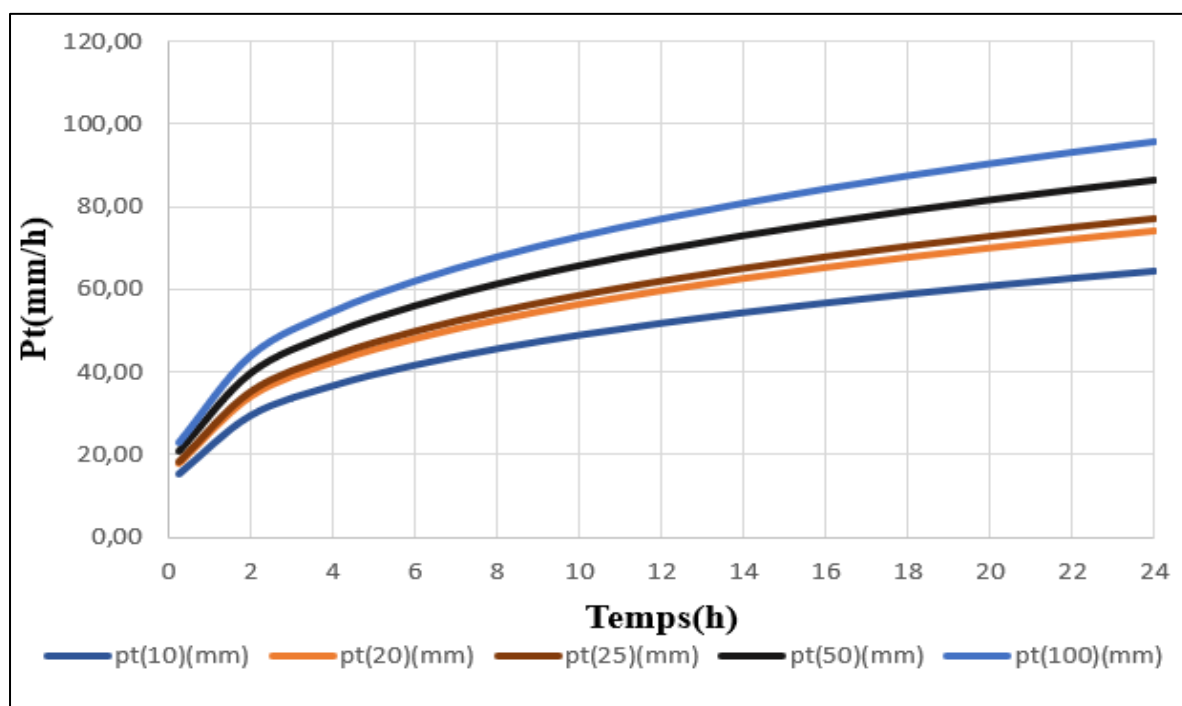


Figure III.18: Courbe des pluies à courte durée de la station Bensakrane

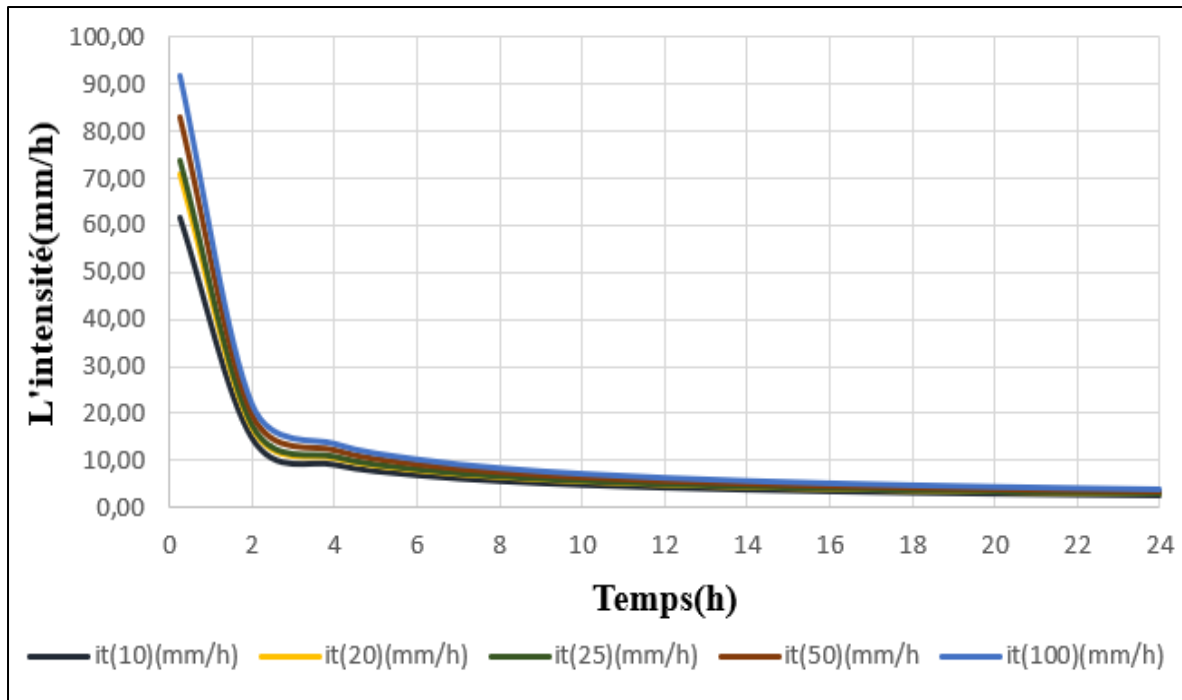


Figure III.19: Courbe IDF de la station Bensakrane

Les courbes de pluies de courte durée ont une allure croissante sur tout l'intervalle des périodes de retour elles sont à son minimum et augmente jusqu'à atteindre son maximum. Les courbes des intensités ont une allure strictement décroissante sur tout l'intervalle des périodes de retour elle est à son maximum et décroît jusqu'à atteindre son minimum.

III.10 Conclusion

Les pluies journalières maximales annuelles de trois stations de bassin versant Isser Sekkak. Ont été testées avec les lois (Gumbel, Log Normale et GEV) les résultats de l'examen visuel Aic, Bic montrent que les données de trois stations s'ajustent bien avec Log normal et Gumbel et dans le test d'adéquation de Klongrov Smirnov montrent que les données de trois stations s'ajustent bien avec Gumbel. Ensuite nous avons choisi la loi de Gumbel pour le calcul des pluies de différentes périodes de retour.

*Chapitre IV Estimation des débits de crue au
moyen des formules empiriques*

IV.1 Introduction

L'étude des crues revêt une place importante dans une étude hydrologique et doit être menée avec prudence pour ne pas tomber dans des erreurs de sous-estimation ou de surestimations compromettant respectivement la sécurité de l'ouvrage et son environnement.

La prédétermination des crues a pour but de relever les crues fréquentielles les plus importantes afin de garantir un maximum de sécurité pour les ouvrages. Ces crues peuvent être déterminées par la loi de Gumbel qui s'adapte le mieux aux écoulements et apports extrêmes.

L'estimation des débits de crue et des volumes correspondants est l'étape initiale Indispensable pour le dimensionnement rationnel des aménagements liés à la protection contre les crues et à la construction des barrages.

Avant toute étude de crue il est important de définir ce qu'est une « crue » et quelles sont les principales variables à déterminer

IV.2 Estimation du débit maximum d'une crue

Précisément connaître les débits extrêmes de crue et les périodes de retour associées peut nous permettre de mesurer le risque et de mieux appréhender les aléas auxquels nous faisons face. Une revue des différentes méthodes de détermination des débits de crue est nécessaire dans notre recherche. En fonction de la disponibilité des données. L'une des méthodes suivantes pourra alors être utilisée. (Tahir Chahrazed.2022)

a) Méthode historique

On parle de méthode historique au sens étroit. C'est une méthode fondée essentiellement sur la recherche des archives, des enquêtes auprès des populations, des recherches de traces des crues exceptionnelles atteintes dans le passé. Elle s'impose lorsque l'on ne dispose pas d'observations sur le maximum de débit enregistré lors de la survenance d'une crue exceptionnelle. (CHABANE R. LABBAOUI T.2016)

b) Méthode empirique

On de fait appel aux formules empiriques lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données disponibles sur les débits de référence des crues dans une région (bassin à jauger). Ces formules sont établies pour de nombreux cours d'eau et dans divers pays permettant d'estimer soit des

débits maximums de crues soit des débits fréquentiels à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données météorologiques en particulier la pluviométrie. (Djamaa. Walid .2018)

IV.3 Les méthodes empiriques utilisées

Dans cette partie on a pris en compte les formules les plus utilisées en Algérie.

IV.3.1 Formule de Sokolovsky (1958-1968)

Cette méthode est couramment appliquée dans les services d'hydrologie des pays indépendants de l'ex URSS ainsi qu'en Algérie. Selon cet auteur la crue est assimilable à un débit de pointe généré par une averse (de pluie ou orage) de courte durée cela même correspondant au temps de concentration en étant bien entendu que le temps de montée de la crue est identique à celui de la concentration. (Abdelmoumen Hanane)

$$Q_{max} = \frac{0.28 \times (P_{tc} - H_0) \times S \times \alpha \% \times F}{T_c} \dots\dots\dots (IV.1)$$

Ptc : pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration.

H₀ : pertes initiales en mm. H₀ = 8 mm

S : Superficie du bassin [Km²].

α% : coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée

T_c : temps de concentration[h]

F : coefficient de forme de crue

IV.3.2 Formule de Giandotti

Dans leur étude concernant les problèmes de l'eau en Algérie ils montrent qu'après avoir vu que le débit maximum de la crue en La méthode de Giandotti utilise les lois de ruissellement qui se basent sur les caractéristiques morphométriques du bassin versant. Elle rend des résultats particulièrement satisfaisants notamment pour les bassins typiquement montagnards. (Bouchera Merah.2021)

$$Q_{max} = \frac{C.S.\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1.5L} * P_{tc} \dots\dots\dots (IV.2)$$

S : surface en km²

Ptc : pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration.

Hmoy : altitude moyenne en m

Hmin : altitude minimale en m

L : longueur du cours d'eau principale en km

C : Coefficient topographique variant entre 0.066 et 0.166

IV.3.3 Formule de Turazza

La formule qui nous intéresse est un peu plus élaborée que les exécutées avec les précipitations car elle appelle au temps de concentration (tc) du bassin c'est-à-dire le temps que met une goutte d'eau tombée au point le plus amont du bassin pour rejoindre l'exutoire. Elle peut s'écrire ainsi (EMI. 1999). Cette formule ne tenant pas compte de la fréquence.

$$Qp\% = \frac{C \times Ip\% \times S}{3.6} \dots \dots \dots (IV.3)$$

Qp%= Débit maximum de fréquence (P%) en mm

Ip%= Intensité de la pluie de fréquence (P%) pour une durée égale au temps de concentration Tc. Intensité de pluies pour une durée égale à Tc pour les différentes périodes de retour.

C : Coefficient de ruissellement lié à la probabilité d'occurrence.

IV.3.4 Formule Possenti

Cette formule a été établie par à partir de l'étude des crues des rivières de quelques bassins montagneux italiens. Elle exprime le débit maximum en fonction des précipitations maximum en 24 heures (KHEDIM Ibtissem.2021).

$$Qp = \frac{\mu \times Pjmax\% \times S}{L} \dots \dots \dots (IV.4)$$

Avec :

Qmax : Débit maximum (m³/s)

Pjmax% : Pluie maximum d'une durée de 24 heures

Lp : Longueur du cours d'eau principal (km)

S : Superficie du bassin versant (km²)

μ : Coefficient d'ajustement compris entre 700 et 800

a. Débits maximums fréquentiels

• **Formule turazza**

$$Qp\% = \frac{C \times Ip\% \times S}{3.6}$$

Calcul de la quantité de pluie maximale durant le temps de concentration :

$$Ptc = Pjmax * \left(\frac{Tc}{24}\right)^b$$

Tableau IV.1: Pluie maximale pendant le temp de concentration

Année(an)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Pjmax	79.3	91.5	95.3	107	119
Ptc	63.25	72.98	76.01	85.34	94.91
Station Tlemcen					
Pjmax	83.95	98.45	103.1	117.2	131.3
Ptc	67.12	78.72	82.43	93.71	104.98
Station Bensakrane					
Pjmax	64.37	73.98	77.02	86.41	95.72
Ptc	52.96	60.87	63.37	71.10	78.76

$$Ip\% = \frac{Ptc}{Tc} \dots\dots\dots (IV.5)$$

Tableau IV.2: Intensité de pluie pour une durée égale à Tc

Année(an)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Ptc	63.25	72.98	76.01	85.34	94.91
Ip%	4.91	5.67	5.91	6.63	7.37
Station Tlemcen					
Ptc	67.12	78.72	82.43	93.71	104.98
Ip%	5.22	6.12	6.41	7.28	8.16
Station Bensakrane					
Ptc	52.96	60.87	63.37	71.10	78.76
Ip%	4.12	4.73	4.92	5.52	6.12

Tableau IV.3: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode et Turazza)

Année(an)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
C	0.475	0.503	0.510	0.531	0.550
Qp%	535.23	660.93	697.95	815.89	939.85
Station Tlemcen					
C	0.487	0.517	0.525	0.548	0.567
Qp%	588.52	732.76	779.16	924.59	1071.70
Station Bensakrane					
C	0.440	0.468	0.476	0.498	0.517
Qp%	419.55	512.90	543.09	637.50	733.13

- Formule de Giandotti

$$Q_{max} = \frac{C.S. \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1.5L} * Ptc$$

Tableau IV.4: Débits maximums pour différentes périodes de retour (méthode de Giandotti)

Année(an)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Ptc	63.25	72.98	76.01	85.34	94.91
Qmax	338.30	390.34	406.55	456.45	507.64
Station Tlemcen					
Ptc	67.12	78.72	82.43	93.71	104.98
Qmax	359.00	421.04	440.89	501.22	561.50
Station Bensakrane					
Ptc	52.96	60.87	63.37	71.10	78.76
Qmax	283.26	325.57	338.94	380.29	421.26

- La méthode de SOKOLOVSKY

$$Q_{max} = \frac{0.28 \times (Ptc - H_0) \times S \times \alpha\% \times F}{Tc}$$

$$\alpha\% = \frac{\sqrt{Ptc} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{Ptc} + \sqrt{H_0}}$$

F : coefficient de forme de crue. $F = \frac{12}{4+3\gamma}$. On prend $\gamma = 5$. $F=0.6316$

Tableau IV.5: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode de Sokolovsky)

Année(an)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Ptc	63.25	72.98	76.01	85.34	94.91
$\alpha\%$	0.475	0.503	0.510	0.531	0.550
Qmax	297.66	350.08	366.40	416.67	468.22
Station Tlemcen					
Ptc	67.12	78.72	82.43	93.71	104.98
$\alpha\%$	0.487	0.517	0.525	0.548	0.567
Qmax	318.51	381.00	400.99	461.76	522.48
Station Bensakrane					
Ptc	52.96	60.87	63.37	71.10	78.76
$\alpha\%$	0.440	0.468	0.476	0.498	0.517
Qmax	242.22	284.83	298.30	339.95	381.22

• Formule de POSSENTI

$$Qp = \frac{\mu \times Pjmax\% \times S}{L}$$

μ : On prend $\mu = 700$

Tableau IV.6: Débits maximums pour différentes périodes de retour (Méthode de Poosenti)

Temps(ans)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Pjmax	79.3	91.5	95.3	107	119
Qp	653.94	754.55	785.89	882.37	981.33
Station Tlemcen					
Pjmax	64.37	73.98	77.02	86.41	95.72
Qp	530.83	610.07	635.14	712.58	789.35
Station Bensakrane					
Pjmax	83.95	98.45	103.1	117.2	131.3
Qp	692.29	811.86	850.21	966.49	1082.76

Tableau IV.7: Débits maximums pour les quatre formules

Temps(ans)	10	20	25	50	100
Station Lalla Setti					
Série1 Sokolovsky	297.66	350.08	366.40	416.67	468.22
Série2 Giandotti	338.30	390.34	406.55	456.45	507.64
Série 3 Turazza	535.23	660.93	697.95	815.89	939.85
Série 4 POSSENTI	653.94	754.55	785.89	882.37	981.33
Station Tlemcen					
Série1 Sokolovsky	318.51	381.00	400.99	461.76	522.48

Série2 Giandotti	359.00	421.04	440.89	501.22	561.50
Série 3 Turazza	588.52	732.76	779.16	924.59	1071.70
Série 4 POSSENTI	530.83	610.07	635.14	712.58	789.35
Station Bensakrane					
Série1 Sokolovsky	242.22	284.83	298.30	339.95	381.22
Série2 Giandotti	283.26	325.57	338.94	380.29	421.26
Série 3 Turazza	419.55	512.90	543.09	637.50	733.13
Série 4 POSSENTI	692.29	811.86	850.21	966.49	1082.76

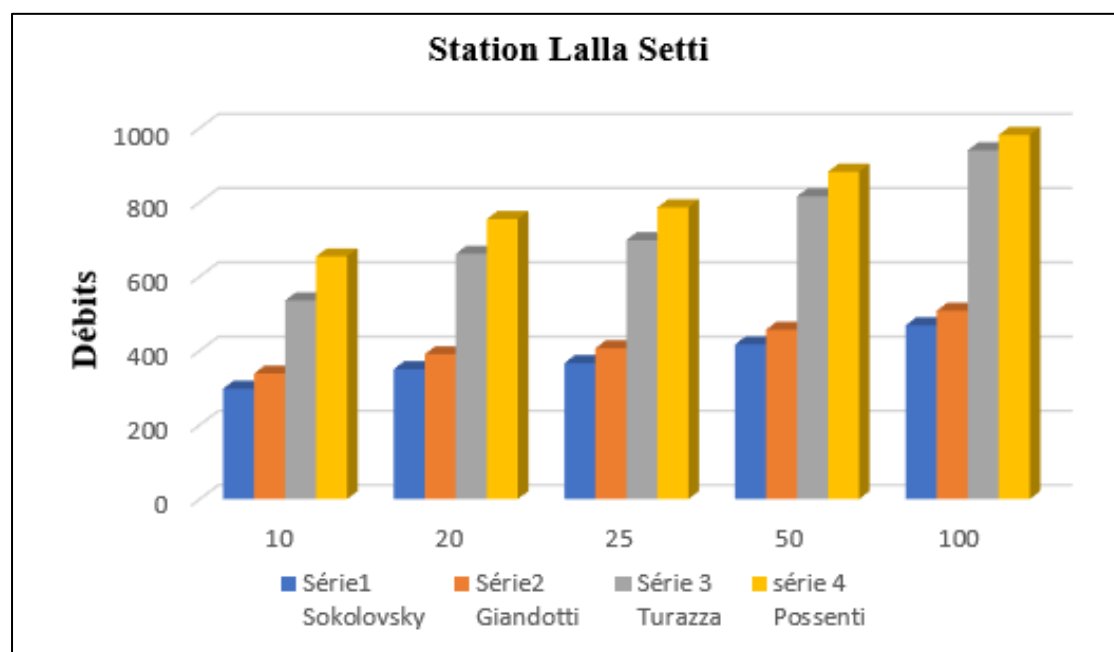


Figure IV.1: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Lalla Setti

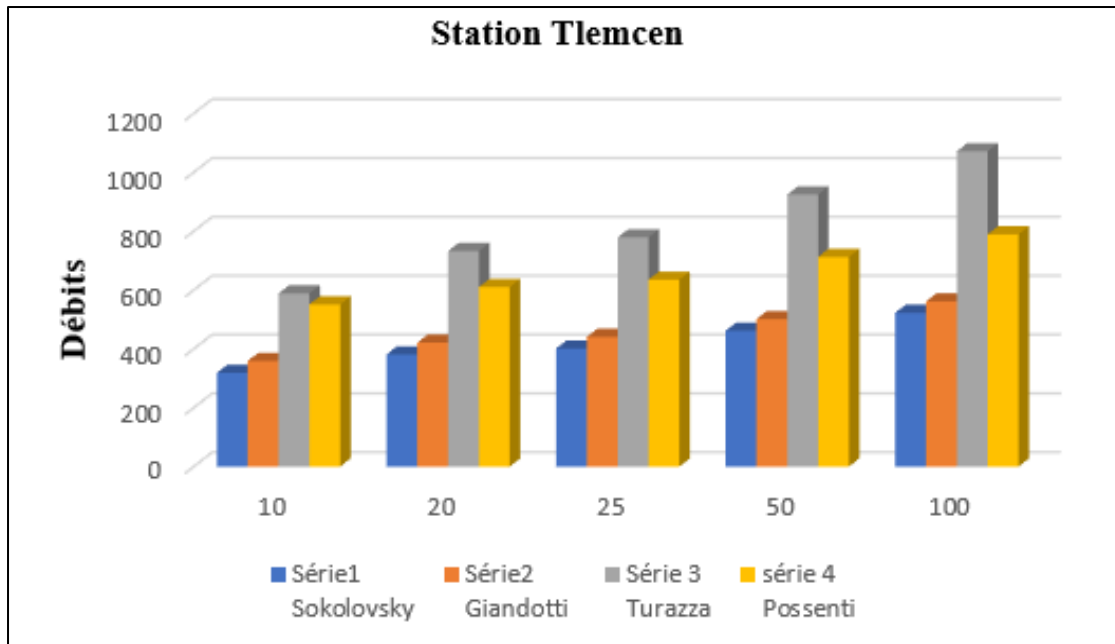


Figure IV.2: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Tlemcen

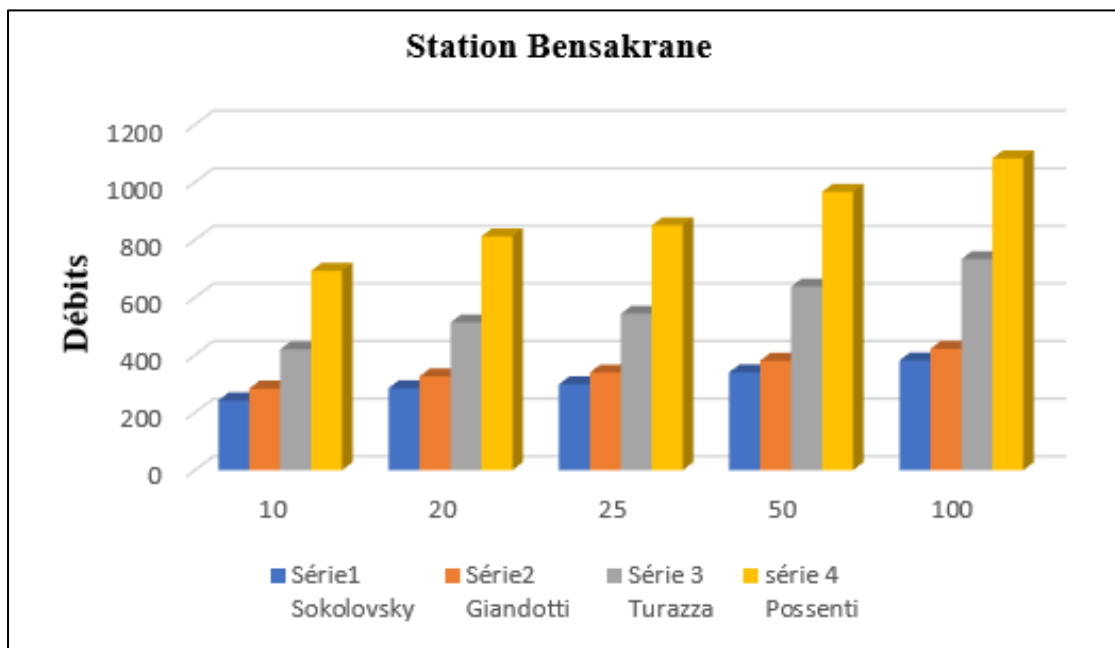


Figure IV.3: Barres des débits maximums pour les quatre méthodes de station Bensakrane

A partir des résultats de calcul (Tableau IV.10) ; pour le bassin versant d'oued Isser Sekkak de superficie de km². Pour les quatre méthodes utilisées des débits des crues pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans. Parmi Les quatre méthodes on a les débits calcule par les méthodes Sokolovsky et Giandottis ont Presque identiques et débits calculés par la méthode du Turazza et Possenti sont déférents. La formule de Sokolovsky présente un avantage par

rapport aux autres formules en effet elle prenden considération tous les paramètres morphologiques du bassin ainsi que le temps de concentration donc elle peut être considérée comme la formule la plus optimale. La surestimation issue de la formule de Turazza s'explique par la nécessité d'évaluer avec précision le coefficient de ruissellement, une tâche particulièrement complexe pour les bassins versants de grande superficie.

IV.4 L'hydrogramme de crue

Il est évident que la connaissance seule du débit maximal d'une crue est insuffisante lorsque l'on procède au dimensionnement d'un ouvrage d'art. une crue pointue (de faible durée) exigera des ouvrages moins importants qu'une crue de même débit maximal qui s'étend sur plusieurs jours et qui comporte plusieurs pointes secondaires. (Bouchera Merah,2015)

C'est une courbe qui représente l'évolution des débits en fonction du temps pendant la crue elle permet d'estimer quelques caractéristiques relatives à la crue telle que la forme, le volume, le temps de montée et temps de base ; pour le tracé de l'hydrogramme on utilise la méthode de SOKOLOVSKY. (Touabia. 2005)

IV.4.1 Construction des hydrogrammes des crues (SOKOLOVSKY)

L'hydrogramme de crue est une figure d'indentification de la crue. à l'aide de L'hydrogramme de crue on peut tirer les paramètres suivants :

- ❖ Le volume de la crue
- ❖ La durée de la crue
- ❖ Le débit maximum de la crue (débit de pointe).

La méthode assimile l'hydrogramme à deux équations paraboliques

a) Pour le temps de montée :

$$Q_m = Q_{max} \% \left(\frac{T}{T_m} \right)^m \dots\dots\dots (IV.6)$$

T_m=T_c : Temps de montée (h)

b) Pour la décrue :

$$Q_d = Q_{max} \% \left(\frac{T_b - T}{T_d} \right)^n \dots\dots\dots (IV.7)$$

Q_{max} (%) : débit maximum de fréquence donnée

T_m : temps de montée (h)

T_d : temps de décrue (h)

T_b : temps de base en heures et qui est calculé par la relation suivante :

$$T_b = T_m + T_d \dots\dots\dots (IV.8)$$

m, n: puissances des paraboles pour l'Algérie m=2 et n=3 ;

β : Coefficient dépendant des caractéristiques du bassin versant il est pris en général compris entre (2 ÷ 4), celui-ci est fonction du cours d'eau (longueur) de la perméabilité et du boisement du bassin. On prend $\beta=3$.

$$T_d = \beta \times T_m \dots\dots\dots (IV.9)$$

Tableau IV.8: Récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue

Bassin	$T_c=T_m$	T_d	T_b
Isser Sikkak	12.87	38.61	51.48

On obtient par conséquent le système d'équation suivant (pour la crue centaine) :

$$Q_m = Q_{max}\% \left(\frac{T}{12.87} \right)^2 \quad \text{Avec :} \quad 0 < T < 12.87 \text{ h}$$

$$Q_d = Q_{max}\% \left(\frac{51.48-T}{38.61} \right)^3 \quad \text{Avec :} \quad 38.61 < T < 51.48 \text{ h}$$

Tableau IV.9: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour de station Lalla Setti

Temps(h)	$Q_{max}(10)$	$Q_{max}(20)$	$Q_{max}(25)$	$Q_{max}(50)$	$Q_{max}(100)$
0	0	0	0	0	0
2	7.19	8.45	8.85	10.06	11.31
4	28.75	33.82	35.39	40.25	45.23
6	64.69	76.09	79.63	90.56	101.76
8	115.01	135.27	141.57	161.00	180.91
10	179.71	211.35	221.21	251.56	282.68
12	258.78	304.35	318.54	362.24	407.06
12.87	297.66	350.08	366.4	416.67	468.22

Tableau IV.10: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station Lalla Setti

Temps(h)	Qd (10)	Qd (20)	Qd (25)	Qd (50)	Qd (100)
12.87	297.66	350.08	366.4	416.67	468.22
14	272.28	320.23	335.16	381.15	428.30
16	230.98	271.66	284.32	323.33	363.33
18	194.08	228.26	238.90	271.67	305.29
20	161.33	189.75	198.59	225.84	253.78
22	132.50	155.83	163.09	185.47	208.42
24	107.32	126.22	132.10	150.23	168.81
26	85.55	100.62	105.31	119.75	134.57
28	66.94	78.73	82.40	93.71	105.30
30	51.25	60.28	63.09	71.75	80.62
32	38.23	44.96	47.06	53.51	60.13
34	27.62	32.49	34.00	38.66	43.45
36	19.18	22.56	23.61	26.85	30.18
38	12.67	14.90	15.59	17.73	19.93
40	7.82	9.20	9.63	10.95	12.31
42	4.41	5.18	5.42	6.17	6.93
44	2.16	2.55	2.66	3.03	3.40
46	0.85	1.00	1.05	1.19	1.34
48	0.22	0.26	0.27	0.31	0.34
50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
51.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

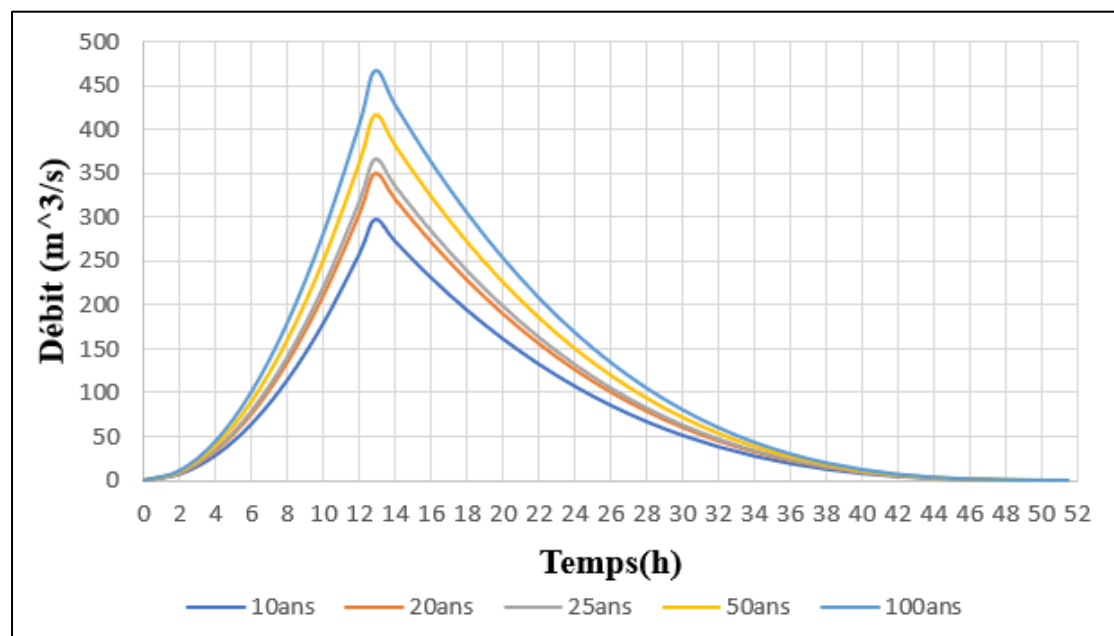


Figure IV.4: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station Lalla setti

Tableau IV.11: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour de station
Tlemcen

Temps(h)	Qmax(10)	Qmax(20)	Qmax (25)	Qmax (50)	Qmax (100)
0	0	0	0	0	0
2	7.69	9.20	9.68	11.15	12.62
4	30.77	36.80	38.73	44.60	50.47
6	69.23	82.81	87.15	100.36	113.56
8	123.07	147.21	154.94	178.42	201.88
10	192.29	230.02	242.09	278.78	315.44
12	276.90	331.23	348.61	401.44	454.23
12.87	318.51	381	400.99	461.76	522.48

Tableau IV.12: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station de
Tlemcen

Temps(h)	Qd (10)	Qd (20)	Qd (25)	Qd (50)	Qd (100)
12.87	318.51	381	400.99	461.76	522.48
14	291.35	348.52	366.80	422.39	477.94
16	247.16	295.65	311.16	358.32	405.43
18	207.67	248.42	261.45	301.07	340.66
20	172.63	206.50	217.34	250.28	283.19
22	141.78	169.59	178.49	205.54	232.57
24	114.83	137.36	144.57	166.48	188.37
26	91.54	109.50	115.25	132.71	150.16
28	71.63	85.69	90.18	103.85	117.51
30	54.84	65.60	69.05	79.51	89.96
32	40.91	48.93	51.50	59.30	67.10
34	29.56	35.35	37.21	42.85	48.48
36	20.53	24.55	25.84	29.76	33.67
38	13.55	16.21	17.06	19.65	22.24
40	8.37	10.02	10.54	12.14	13.73
42	4.71	5.64	5.94	6.84	7.73
44	2.32	2.77	2.92	3.36	3.80
46	0.91	1.09	1.15	1.32	1.49
48	0.23	0.28	0.29	0.34	0.38
50	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
51.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

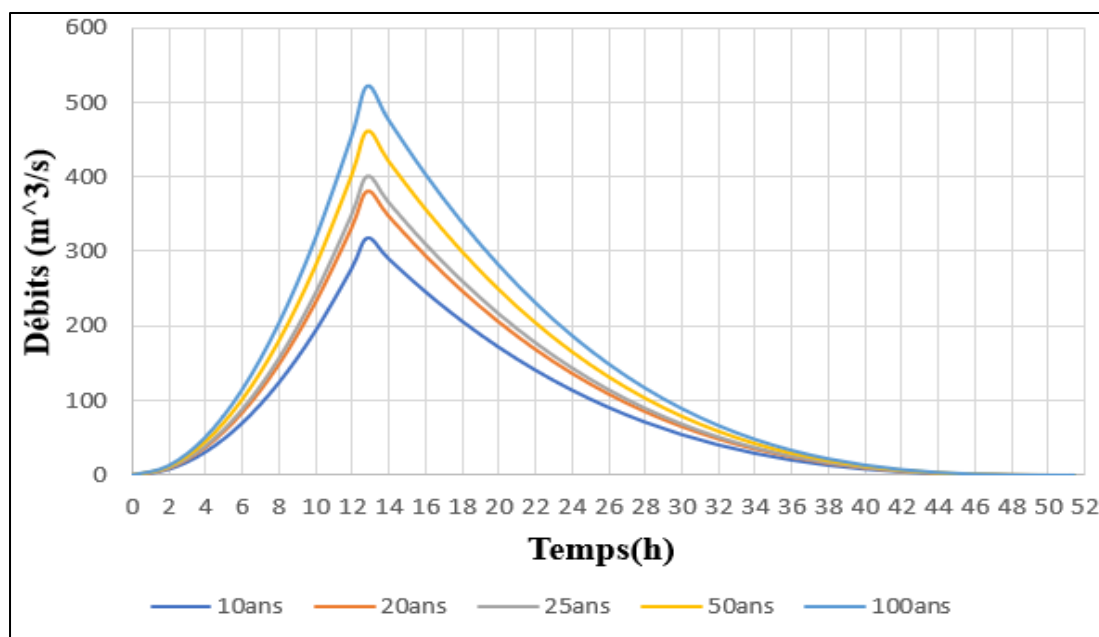


Figure IV.5: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station Tlemcen

Tableau IV.13: Résultats débits des crues pour différentes périodes de retour station de Bensakrane

Temps(h)	Qmax(10)	Qmax(20)	Qmax (25)	Qmax (50)	Qmax (100)
0	0	0	0	0	0
2	5.85	6.88	7.20	8.21	9.21
4	23.40	27.51	28.81	32.84	36.82
6	52.64	61.91	64.83	73.89	82.86
8	93.59	110.05	115.26	131.35	147.30
10	146.24	171.96	180.09	205.24	230.15
12	210.58	247.62	259.33	295.54	331.42
12.87	242.22	284.83	298.3	339.95	381.22

Tableau IV.14: Résultats débits des décrues pour différentes périodes de retour de station
Bensakrane

Temps(h)	Qd (10)	Qd (20)	Qd (25)	Qd (50)	Qd (100)
12.87	242.22	284.83	298.3	339.95	381.22
14	221.57	260.55	272.87	310.97	348.72
16	187.96	221.02	231.48	263.79	295.82
18	157.93	185.71	194.50	221.65	248.56
20	131.28	154.38	161.68	184.26	206.62
22	107.82	126.79	132.78	151.32	169.69
24	87.33	102.69	107.55	122.56	137.44
26	69.62	81.86	85.73	97.70	109.57
28	54.48	64.06	67.09	76.46	85.74
30	41.71	49.04	51.36	58.54	65.64
32	31.11	36.58	38.31	43.66	48.96
34	22.48	26.43	27.68	31.55	35.38
36	15.61	18.36	19.23	21.91	24.57
38	10.31	12.12	12.69	14.47	16.22
40	6.37	7.49	7.84	8.94	10.02
42	3.59	4.22	4.42	5.03	5.64
44	1.76	2.07	2.17	2.47	2.77
46	0.69	0.81	0.85	0.97	1.09
48	0.18	0.21	0.22	0.25	0.28
50	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
51.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

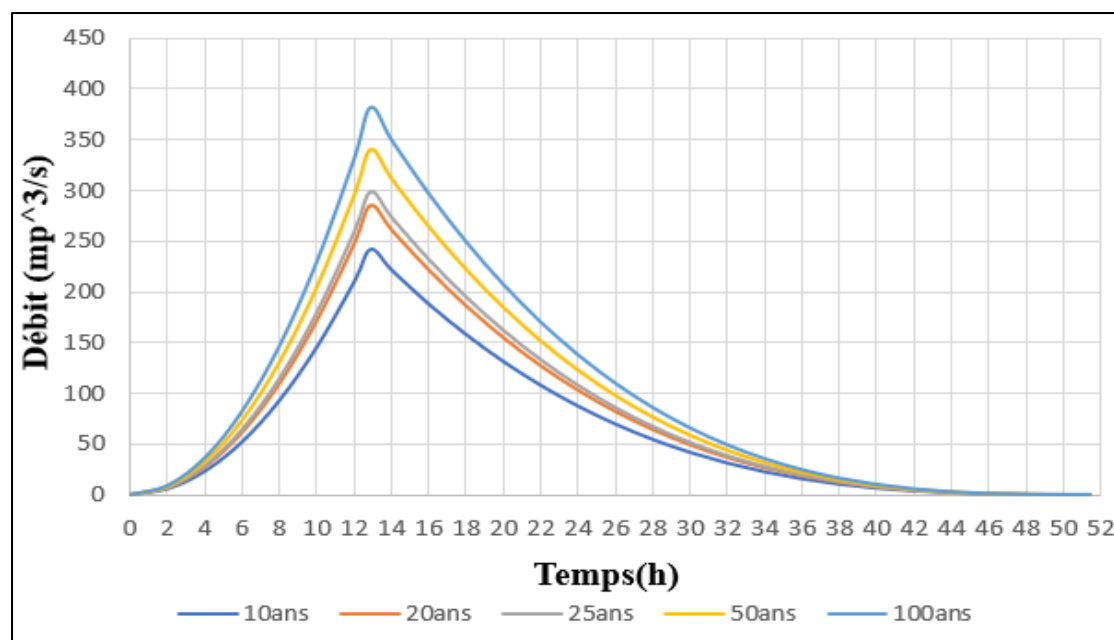


Figure IV.6: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de station
Bensakrane

IV.4.2 Calcul de volume de la crue :

$$W_1 = Q_{max} \frac{T_m}{m+1} \dots\dots\dots (IV.10)$$

$$W_2 = Q_{max} \frac{T_d}{n+1} \dots\dots\dots (IV.11)$$

$$W_t = W_1 + W_2 \dots\dots\dots (IV.12)$$

Avec :

W1 : apport pendant la crue (Hm).

W2 : apport pendant la décrue.

Wt : apport total (Hm).

Tableau IV.15: Volume de crue des trois stations

T (an)	10	20	25	50	100
Station lalla setti					
W1	1276.96	1501.84	1571.86	1787.51	2008.66
W2	2873.16	3379.15	3536.68	4021.91	4519.49
WT	4150.12	4880.99	5108.53	5809.42	6528.16
Station de Tlemcen					
W1	1366.41	1634.49	1720.25	1980.95	2241.44
W2	3074.42	3677.60	3870.56	4457.14	5043.24
WT	4440.83	5312.09	5590.80	6438.09	7284.68
Station de Bensakrane					
W1	1039.12	1221.92	1279.71	1458.39	1635.43
W2	2338.03	2749.32	2879.34	3281.37	3679.73
WT	3377.15	3971.24	4159.05	4739.75	5315.16

IV.5 Conclusion

L'estimation des crues révèle une grande importance Pour la sécurité de l'ouvrage à implanter. Pour la détermination du débit de pointe probable de la crue des différentes périodes de retour Différentes formules empiriques ont été sélectionnées pour le calcul par manque d'observation.

D 'après les résultats obtenues nous avons conclu que la méthode du Sokolovsky est la plus optimal pour la détermination des débits maximum pour bassin Oued Isser Sekkak.

Suite au calcul du débit maximum par cette méthode on retient dans station Lalla Setti un débit de projet Q (100) de 486.22m³/s et un volume de crue de 6528.16m³ un débits projet Q (100) de 522.48m³/s et un volume de crue de 7284.68m³ pour station de Tlemcen et en fin un débits Q (100) de 381.22m³/s et volume de crue de 5315.16m³ pour station Bensakrane.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche scientifique visant à analyser le comportement des précipitations maximales annuelles et journalières à travers trois stations pluviométriques situées dans le sous bassin versant IsserSekkak. Dans un contexte marqué par la recrudescence des événements hydro-climatiques extrêmes, l'analyse fréquentielle constitue un outil indispensable pour la prévision des hauteurs de pluie associées à des périodes de retour données, et donc pour la prévention des risques hydrologiques.

L'objectif fondamental de cette recherche a été de tester plusieurs lois de probabilité, notamment GEV, Gumbel, Pearson III, Log-normale et afin d'identifier celle qui s'ajuste le mieux aux données empiriques observées. L'utilisation du logiciel spécialisé HYFRANPlus, permettant une évaluation rigoureuse des paramètres et quantiles associés aux extrêmes pluviométriques. Les résultats obtenus indiquent que les séries des précipitations maximales présentent une bonne compatibilité avec les lois étudiées, en particulier la loi Gumbel.

La méthodologie a d'abord consisté à évaluer la pluie maximale journalière fréquentielle, ainsi que les précipitations de courte durée et leur intensité, afin de construire les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).

Dans un second temps, l'estimation des débits de pointe a été réalisée à l'aide de méthodes empiriques. Après une analyse comparative des différentes formules disponibles, ces dernières ont été appliquées pour évaluer les crues extrêmes sur des périodes de retour allant de 5 à 100 ans. Enfin, la détermination des paramètres temporels (temps de base, de montée et de décrue) a permis de calculer les débits de crue et de décrue, aboutissant à la construction des hydrogrammes de crue pour chaque période de retour.

Enfin, des travaux futurs pourraient intégrer l'impact du changement climatique sur l'évolution des crues, en étudiant l'influence de scénarios climatiques futurs sur les débits extrêmes et sur l'extension des zones inondables, afin de renforcer la résilience des territoires face aux risques hydrologiques.

Liste des références

- [1] **ABDELMOUMENE Hanane**, Méthodes de prédétermination des débits maximums, application au bassin versant de l'oued Sebdou (N.W algérien), Mémoire de Master 2021, Université Tlemcen.
- [2] **Abderrazak Bouanani**, Etude de quelques sous bassin de la Tafna (NW_Algerie), Thèse de Doctorat 2004, Université Tlemcen.
- [3] **Ali HACHEMI**, Contribution à l'étude des crues d'oued Abiod (Biskra), Thèse de doctorat 2017, université Biskra
- [4] **ARACHI Khadra**, Analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Reboa (hauts plateaux constantinois), mémoire de mastre 2025, Université Djelfa
- [5] **Belarbi Fadila**, Etude de des précipitations, du transport solide dans le bassin versant de la Tafna et leur interrelation, Thèse doctorat 2018, université Tlemcen.
- [6] **BENEST Michel, BENSALAH Mustapha**, (1999) -La couverture mésozoïque du domaine tlemcenien 'Avant pays Tellien d'Algérie occidentale : Stratigraphie, Paléo-environnement, dynamique sédimentaire et tectogenèse alpine. Bulletin du service géologique de l'Algérie, vol.10, n°2.
- [7] **BENINA Touabia**, "Manuel Pratique d'hydraulique" 2005, Institut de l'ENSH Blida
- [8] **Benmechernane Nabila**, Etude de protection de la ville de Bensekrane (W.Tlemcen).contre les inondation , Mémoire de master 2013, Université de Tlemcen.
- [9] **BERHAIL Sabri**, Etude des processus hydrologiques de formation des crues dans le bassin versant de la Seybouse, THESE de doctorat Lmd, Université Badji Mokhtar Annaba
- [10] **Bouchelkia Hamid**, Les inondations et les crues
- [11] **Bruno Ambroise**, La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant, 1998
- [12] **CHABANE, R. et LABBAOUI, T.** "ETUDE DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS DE LA VILLE D'EL BAYADH (OUED DEFFA) ", Mémoire de Master 2016, Université Bejaia.

[13] Chetioui Saida, Berrek Imene, stimation des débits de crues de différents temps de retour à l'aide de plusieurs méthodes D'un bassin versant MEDJEZ ELBGAR –Guelma, Mémoire fin d'étude master Juin2019, UNIVERSITE ANNABA.

[14] Djamaa, Walid, Etude du comportement hydrologique du barrage de kisser, Mémoire de master 2018, Université Jijel.

[15] Guardia,P(1975).

[16] Hakmi Zohra, QUEL IMPACT SUR LA VARIABILITE DES ECOULEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SIKKAK, mémoire fin étude 2013, Université d 'Oran

[17] HARIK MERIEM, CONTRIBUTION A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES CRUES DANS DEUX BASSINS VERSANTS DU CENTRE DE L'ALGERIE, Mémoire de master 2021, Université Jijel.

[18] houichi larbi , university betna, TRANSFORMATION DE LA PLUIE EN HYDROGRAMME DE CRUE.

[19] Iratni Nawel, Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versant de la Tafna, Mémoire de MAGISTER 2014, Université d'Oran.

[20] JAVELLE, P., 2001, Thèse de doctorat. Caractérisation du régime des crues : le modèle débit 64 Grenoble. Durée fréquence convergent : Approche locale et régionale. Institut National polytechnique de Grenoble.

[21] Jean-Cléophas Ondo Taha B.M.J. Ouarda Bernard Bobée, TESTS D'HOMOGENÉITÉ ET D'INDÉPENDANCE, Rapport de recherche N° R-500 juin 1997

[22] J-P LENOIR, CHAPITRE 6 /PROBABILITES - STATISTIQUES Page 98

[23] KALBAZA Mourad, Prévention Et Gestion Du Risque Des Zones Inondable De La Ville De Ghardaïa A L'aide D'un Système D'information Géographique (S.I.G), Mémoire de Master 2016, UNIVERSITE LAGHOUAT.

[24] ketrouci Khadidja, Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie, Thèse Doctorat 2004, université d'Oran.

[25] Khadîdja BENZINEB, MODELISATION DES DEBITS DE CRUES DU BASSIN DE OUED OUAHRANE PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, Thèse de doctorat2017, Université Chlef.

[26] Khadir Djennat, Benslimane Maarouf, Prédiction de défauts dans un système mécanique par analyse du signal vibratoire, mémoire fin étude master, UNIVERSITÉ TIARET.

[27] **KHEDIM Ibtissem**, Contribution à l'étude des débits maximums par l'utilisation des formules empiriques dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar (ex. Chouly) (TAFNA NORD OUEST ALGERIEN), Mémoire de Master 2021, Université Tlemcen.

[28] **Knapp, B, J**, Elements of goeographical hydrology, London : allen &unwin 1979.

[29] **Kouassi Mchel**, Modélisation statistique et alertes de crues dans le bassin versant de la Marahoué (Bandama. Côte d'Ivoire), Article IJIAS-21-176-04

[30] **Madi Meriem**, Etude Expérimentale Du Processus De Ruissellement Sous Pluies Simulées, Mémoire de Magister 26 Avril 2012, Université Biskra

[31] **MARIO HACHÉ**, MODÉLISATION DE VARIABLES DE PRÉCIPITATION PAR DES DISTRIBUTIONS STATISTIQUES,1993

[32] **Merah Bouchra**, Prédétermination des débits de crues par différentes FORMULES EMPIRIQUES cas du bassin versant de l'OUed SAIdA, Mémoire fin étude master 2021, Université Oran

[33] **Mlle YAKHOU Bakhta, Mlle ZENTICI Chaima**, Analyse fréquentielle univariée des crues dans le bassin versant du Chélif, Mémoire de fin d'étude master 13juillet 2022, Université de khemis-miliana

[34] **Philippe Cantet**, Impacts du Changement Climatique sur les Pluies Extrêmes par l'Utilisation d'un Générateur Stochastique de Pluies, Thèse de doctorat 09 Décembre 2009, UNIVERSITÉ MONTPELLIER II France

[35] **Pourriot at al (1995)**, Limnologie générale, Paris

[36] **Roch (1963)**, Hydrologie de surface, Paris : Gauthier-villars

[37] **SEKHERI Romaissa, MESKINE Aicha**, Régionalisation des paramètres climatiques, cas du bassin versant Kébir-Rhumel, Nord-Est de l'Algérie, Mémoire de Master 2020, Universitaire Mila.

[38] **SOUANEF Nassima**, Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod, Mémoire de Magister 09 Avril 2015, Université Mohamed Khider – Biskra

[39] Tahir Chahrazed, Analyse des débits de crue et d'étiage du bassin versant d'Oued Khemis (NW Algérien), Mémoire de Master 2022, Université Tlemcen.